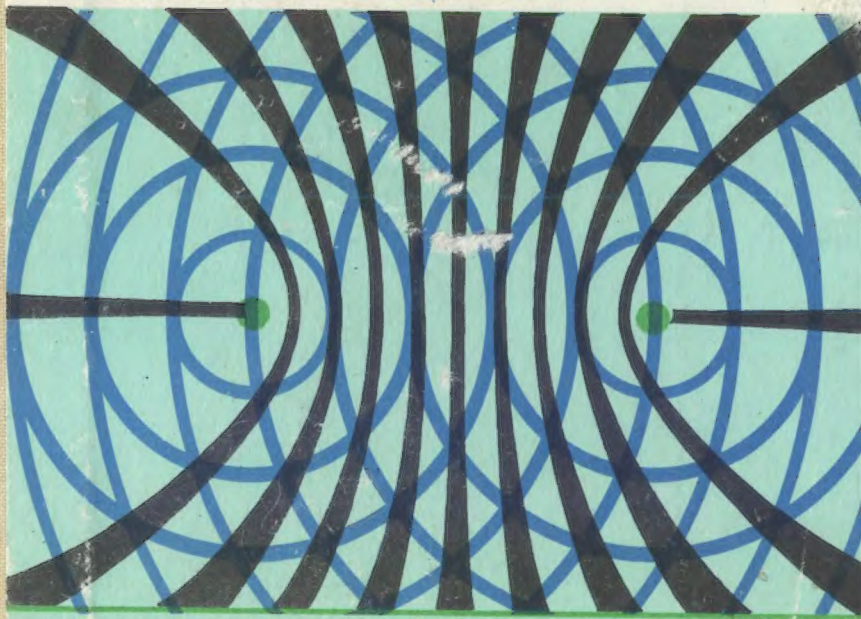
Н. И. Кошкин

Элементарная ФИЗИКА



Справочник

Н. И. КОШКИН

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ФИЗИКА

Справочник

Москва «Наука»
Главная редакция
физико-математической литературы
1991

ББК 22.3
К76
УДК 53(083)

КОШКИН Н. И. Элементарная физика: Справочник.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991.— 240 с. Ил.— 262. ISBN 5-02-014507-6

Приведены основные понятия, определения и законы физики. Логика и структура изложения позволяют оперативно находить четкие и краткие ответы или справочные данные по различным вопросам элементарной физики. Наряду с простотой теоретический уровень изложения соответствует современному состоянию принятых в научных исследованиях понятий и формулировок основных законов физики.

Для учащихся школ, профессионально-технических училищ и техникумов.

Рецензент
доктор физико-математических наук *А. С. Лагунов*

К $\frac{1604010000—009}{053(02)-91}$ 118-90

ISBN 5-02-014507-6

© «Наука». Физматлит, 1991

Оглавление

Введение 7
Основные и дополнительные единицы СИ 11
Производные единицы международной системы единиц СИ 13

Глава I

Механика

1. Кинематика 21
2. Кинематические величины 22
3. Основные уравнения кинематики материальной точки 25
4. Траектории тел в поле тяготения Земли 26
5. Движение тел с малыми скоростями 27
6. Законы динамики 28
7. Динамика вращательного движения 31
8. Моменты инерции однородных тел 33
9. Неинерциальные системы отсчета 34
10. Основной закон движения тел в неинерциальных системах отсчета. Силы инерции 35
11. Силы трения 35
12. Работа, мощность, энергия 37
13. Законы сохранения в механике 40
14. Формулы расчета кинетической и потенциальной энергии 40
15. Простейшие механизмы 41
16. Закон всемирного тяготения 43
17. Статика твердого тела 45
18. Центры масс однородных тел 46
19. Деформации и силы упругости 46
20. Механика жидкостей и газов 49
21. Коэффициент гидродинамического сопротивления 53
22. Механические колебания и волны 53
23. Формулы расчета скорости волн в изотропных средах 64

Глава II

Термодинамика и молекулярная физика

1. Температура, теплота, теплоемкость 66
2. Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68) 68
3. Законы термодинамики 69
4. Фазовые переходы 72
5. Идеальные газы 74
6. Реальные газы 76
7. Молекулярно-кинетическая теория 77

8. Свойства жидкостей 82
9. Кристаллические и аморфные тела 84
10. Жидкие кристаллы 85
11. Полимеры 87
12. Плазма 90

Глава III

Электродинамика

1. Электрическое поле неподвижных зарядов (электростатика) 91
2. Напряженность электрического поля 98
3. Электроемкость конденсаторов и проводников 100
4. Постоянный электрический ток 101
5. Электрический ток в электролитах 108
6. Электропроводность газов и плазмы 111
7. Электропроводность полупроводников 113
8. Взаимодействие движущихся заряженных частиц. Магнитное поле 116
9. Магнитные поля токов различной конфигурации 120
10. Электромагнитная индукция 121
11. Индуктивность различных проводников 125
12. Намагничение вещества 126
13. Основные уравнения электродинамики 129
14. Переменный электрический ток 131
15. Основные формулы расчета цепей переменного тока 132
16. Электрические колебания и электромагнитные волны 134

Глава IV

Оптика

1. Фотометрические величины 138
2. Геометрическая оптика 139
3. Оптические приборы 145
4. Волновая оптика 148
5. Квантовая оптика 156

Глава V

Строение атома и элементарные частицы

1. Единицы, используемые в атомной и ядерной физике 163
2. Волновые свойства частиц 163
3. Строение атома 164
4. Атомное ядро 167
5. Радиоактивные процессы 171
6. Ядерные реакции 173
7. Взаимодействие ядерных излучений с веществом 175
8. Единицы радиоактивности и ионизирующих излучений 177
9. Фундаментальные взаимодействия 178
10. Элементарные частицы и их классификация 180
11. Основные характеристики элементарных частиц 182
12. Кварки и структура адронов 183

Справочные таблицы

Табл. 1. Кинематические параметры планет 184
Табл. 2. Первая и вторая космические скорости 184
Табл. 3. Периоды обращения T спутников Земли 184
Табл. 4. Динамические характеристики планет Солнечной системы 185
Табл. 5. Напряженность земного поля тяготения (ускорение свободного падения) на уровне моря 185
Табл. 6. Плотности, модули упругости и коэффициенты Пуассона 185
Табл. 7. Плотности воды и ртути при различных температурах 186
Табл. 8. Плотность газов 186
Табл. 9. Коэффициенты трения 187
Табл. 10. Коэффициенты отражения звуковых волн полированными поверхностями металлов 187
Табл. 11. Коэффициент поглощения звука в воздухе 188
Табл. 12. Свойства Земли на различных глубинах и скорость сейсмических волн 188
Табл. 13. Скорость звука в газах 188
Табл. 14. Скорость звука в твердых изотропных материалах 189
Табл. 15. Удельные теплоемкости c_p, теплоты плавления λ, теплоты парообразования r, температуры плавления $t_{пл}$ и кипения $t_{кп}$ 189
Табл. 16. Температурный коэффициент длины твердых изотропных тел 190
Табл. 17. Относительные изменения объема при плавлении 191
Табл. 18. Удельная теплоемкость газов при нормальном давлении 191
Табл. 19. Температурный коэффициент объема β жидкостей 191
Табл. 20. Критические параметры 192
Табл. 21. Теплопроводность газов при нормальном давлении ... 192
Табл. 22. Температурные коэффициенты давления газов 193
Табл. 23. Коэффициенты диффузии газов в воздухе 193
Табл. 24. Газокинетические диаметры молекул 193
Табл. 25. Постоянные Ван-дер-Ваальса 193
Табл. 26. Вязкость газов 194
Табл. 27. Вязкость газов при различных давлениях 194
Табл. 28. Вязкость воды при различных температурах 194
Табл. 29. Вязкость жидкостей 194
Табл. 30. Поверхностное натяжение жидкостей 195
Табл. 31. Удельная теплота сгорания топлива 195
Табл. 32. Электроизолирующие материалы 196
Табл. 33. Диэлектрическая проницаемость жидкостей 197
Табл. 34. Диэлектрическая проницаемость газов 197
Табл. 35. Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления металлов 197
Табл. 36. Сплавы с высоким активным сопротивлением 198
Табл. 37. Удельное сопротивление электролитов различных концентраций 198
Табл. 38. Свойства полупроводников 199
Табл. 39. Гальванические элементы и аккумуляторы 199
Табл. 40. Магнитные свойства магнитно-мягких материалов 201
Табл. 41. Основные свойства магнитно-твердых материалов 201

Табл. 42. Индукция и потери на гистерезис в ферромагнетиках и ферритах 202
Табл. 43. Шкала электромагнитных излучений 202
Табл. 44. Световая отдача, КПД, яркость источников света 203
Табл. 45. Освещенность 204
Табл. 46. Поглощение солнечной радиации поверхностью Земли 204
Табл. 47. Отражение света металлами 205
Табл. 48. Дисперсия показателя преломления 206
Табл. 49. Удельная постоянная вращения 207
Табл. 50. Спектры излучения металлов 207
Табл. 51. Спектры излучения газов 208
Табл. 52. Распределение электронов во внешних оболочках 208
Табл. 53. Массовые коэффициенты ослабления электронов в алюминии 209
Табл. 54. Средний массовый пробег протонов высокой энергии 210
Табл. 55. Относительная масса и активность некоторых изотопов 210
Табл. 56. Бета- и гамма-радиоактивные ядра 213
Табл. 57. Моменты импульсов и магнитные моменты нуклонов и ядер 213
Табл. 58. Реакции синтеза и энерговыделение 214
Табл. 59. Термоядерные реакции во Вселенной 214
Табл. 60. Дозовые пределы облучения 215

Приложения

I. Расчет погрешностей 216
II. Множители для образования десятичных кратных и дольных единиц 219
III. Некоторые внесистемные единицы в единицах СИ 219
IV. Универсальные физические константы 221
V. Основные формулы и законы 222
VI. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева 230

Предметный указатель 232

Введение

Скаляры и векторы

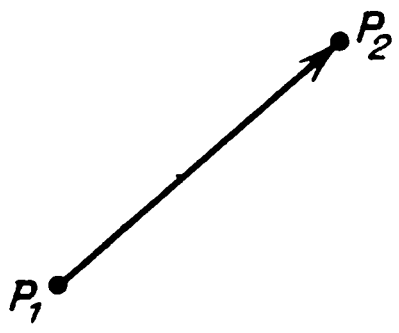


Рис. 1

Величина, значение которой определяется только положительными и отрицательными числами, называется *скаляром* (скалярной величиной). Примеры скалярных величин: масса, заряд, плотность, работа. Величины, значения которых определяются не только действительными числами, но и направлением в пространстве, называются *векторами* (векторными величинами). Например, ускорение, скорость, сила, напряженность поля и т. п.— векторные величины. Вектор изображается направленным отрезком в пространстве (рис. 1). Точка P_1 называется началом вектора, P_2 — концом. Длина отрезка P_1P_2 называется модулем вектора. Два вектора равны друг другу, если они имеют равные модули и одинаковые направления.

Векторная сумма

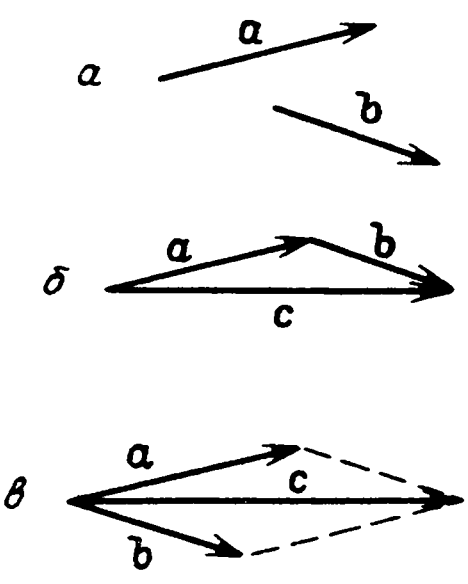


Рис. 2

Первый способ: переносятся векторы **a** и **b** (рис. 2, *а*) параллельно самим себе так, чтобы конец одного вектора совместился с началом другого вектора; тогда вектор, проходящий через начало первого вектора и конец другого вектора (рис. 2, *б*), равен сумме этих векторов. Эта сумма называется *векторной*: $\mathbf{a}+\mathbf{b}=\mathbf{c}$.

Второй способ: переносятся векторы **a** и **b** параллельно самим себе так, чтобы начала их сов-

местились (рис. 2, *в*), сумма векторов будет изображаться диагональю параллелограмма, построенного на этих векторах (на рис.2 *в* сумма векторов равна **с**). Поэтому иногда говорят, что векторы складываются по правилу параллелограмма.

Разложение вектора

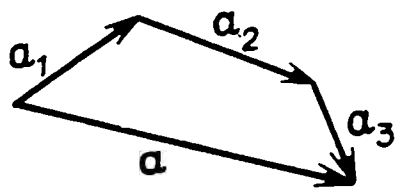


Рис. 3

Вектор **а** заменяется суммой нескольких векторов $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$ и т. д. (рис. 3). Например, составляющими вектора **а** на рис. 3 являются векторы $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$, $\mathbf{a}_3$:

$$\mathbf{a}=\mathbf{a}_1+\mathbf{a}_2+\mathbf{a}_3.$$

Умножение вектора на скаляр

При умножении вектора на положительное число получается вектор с тем же направлением, но с другим модулем; при умножении вектора на отрицательное число направление его изменится на противоположное; модуль вектора также изменится:

$$\mathbf{a}\cdot k=k\mathbf{a},\quad \mathbf{a}\cdot(-k)=-k\mathbf{a}.$$

Разность векторов

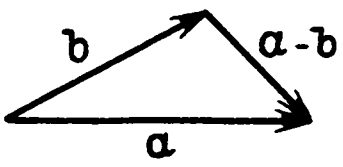


Рис. 4

Начала векторов **а** и **b** совмещаются (без изменения их направлений), затем проводится вектор от конца вычитаемого вектора **b** к концу уменьшаемого вектора **а**; этот вектор будет равен разности векторов **а** и **b** (рис. 4):

$$\mathbf{a}-\mathbf{b}=\mathbf{c}.$$

Скалярное произведение

Скалярное произведение **ab** двух векторов **а** и **b** равно произведению их модулей a и b (или $|\mathbf{a}|$ и $|\mathbf{b}|$) на косинус угла φ между ними, т. е. $\mathbf{ab}=ab\cos\varphi$.

Угол между векторами изменяется в пределах от 0 до π. Скалярное произведение векторов — величина скалярная.

Векторное произведение

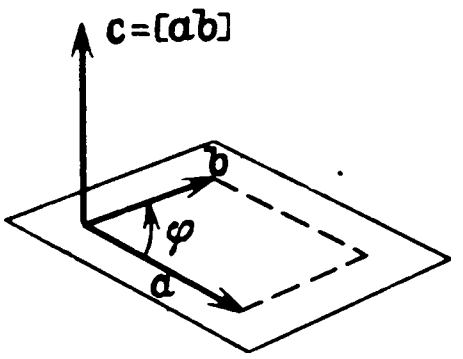


Рис. 5

Векторное произведение [**ab**] двух векторов **a** и **b** образует новый вектор **c**, направленный перпендикулярно к плоскости, в которой лежат векторы **a** и **b**, равный по модулю произведению их модулей на синус угла φ между ними, т. е. $ab\sin\varphi$ (рис. 5). Обозначение векторного произведения $[\mathbf{ab}]=\mathbf{c}$.

Правило винта

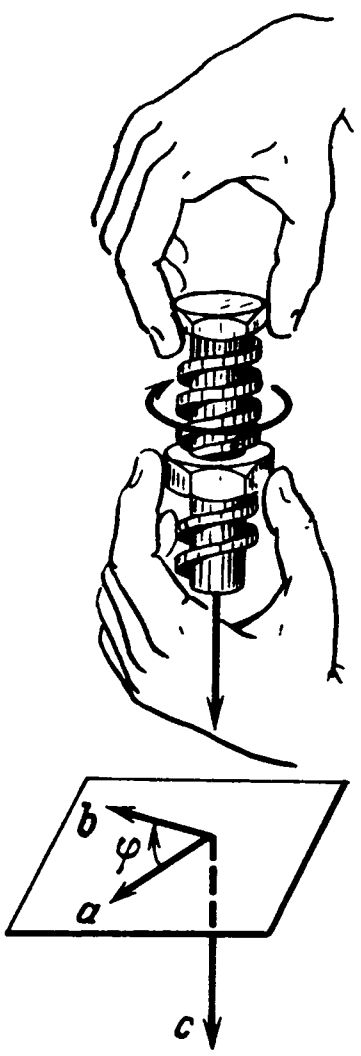


Рис. 6

Направление вектора **c** можно определить по *правилу правого винта*: если поворот головки винта соответствует повороту вектора **a** к вектору **b** по наименьшему углу, то поступательное перемещение винта будет указывать направление вектора **c** (рис. 6).

Единичный вектор

Вектор называется единичным, если его модуль равен единице. Любой вектор можно представить как произведение его модуля на единичный вектор; например, $\mathbf{b}=|\mathbf{b}|\mathbf{b}_0$ ($\mathbf{b}_0$ — единичный вектор); единичный вектор не имеет размерности, его направление совпадает с направлением вектора **b**.

Системы единиц

Единица физической величины — это физическая величина, которой по определению присвоено число-

вое значение, равное единице. Единицы разделяются на два типа — основные и производные. Основные единицы устанавливаются независимо от единиц других величин; производные единицы определяются через основные единицы на основании зависимости между определяемой величиной и величинами, единицы которых выбраны в качестве основных.

Совокупность основных и производных единиц, связанных между собой определенными соотношениями, называется системой единиц. В соответствии с ГОСТ 8.417-81 (СЭВ 1052-78) в физике используется Международная система единиц (СИ). Допускается также применение некоторых внесистемных единиц.

Основные единицы

В СИ используются семь основных единиц: метр (м) — единица длины, килограмм (кг) — единица массы, секунда (с) — единица времени; ампер (А) — единица силы электрического тока, кельвин (К) — единица температуры, моль (моль) — единица количества вещества, кандела (кд) — единица силы света, а также две дополнительные единицы — плоский угол (радиан, рад) и телесный угол (стерадиан, ср). Наименование основных и дополнительных единиц СИ, а также их определения приводятся в таблице.

Основные и дополнительные единицы СИ

Физическая величина	Единица		Определение
	Наименование	Обозначение	
Основные единицы			
Длина	метр	m; м	*Метр* равен расстоянию, которое проходит плоская электромагнитная волна в вакууме за 1/299792458 долю секунды
Масса	килограмм	kg; кг	Килограмм равен массе международного прототипа килограмма
Время	секунда	s; с	*Секунда* равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133
Сила электрического тока	ампер	A; А	*Ампер* равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенными в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н
Термодинамическая температура	кельвин	K; К	*Кельвин* равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды
Количество вещества	моль	mol; моль	*Моль* равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг
Сила света	кандела	cd; кд	*Кандела* равна силе света в заданном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср

Продолжение

Физическая величина	Единица		Определение
	Наименование	Обозначение	
Дополнительные единицы			
Плоский угол	радиан	rad; рад	*Радиан* равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу
Телесный угол	стерадиан	sr; ср	*Стерадиан* равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы

Производные единицы международной системы единиц (СИ)

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
	I. Пространство и время	
Площадь	*Квадратный метр* равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны одному метру	$м^2$
Объем	*Кубический метр* равен объему куба с ребрами, длины которых равны одному метру	$м^3$
Скорость	*Метр в секунду* равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой эта точка за время одна секунда перемещается на расстояние один метр	м/с
Ускорение	*Метр на секунду в квадрате* равен ускорению прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время одна секунда скорость точки изменяется на один метр в секунду	$м/с^2$
Угловая скорость	*Радиан в секунду* равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, все точки которого за время одна секунда поворачиваются относительно оси на угол один радиан	рад/с
Угловое ускорение	*Радиан на секунду в квадрате* равен угловому ускорению равноускоренно вращающегося тела, при котором за время одна секунда изменяется угловая скорость на один радиан в секунду	$рад/с^2$
	II. Периодические колебания	
Период	*Секунда*	с
Частота периодического процесса	*Герц* равен частоте периодического процесса, при которой за время одна секунда совершается один цикл периодического процесса	Гц
Волновое число	*Метр в минус первой степени* равен волновому числу излучения с длиной волны один метр	$м^{-1}$

Продолжение

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Коэффициент затухания	*Секунда в минус первой степени* равна коэффициенту затухания, при котором за время одна секунда амплитуда уменьшается в e раз (e — основание натуральных логарифмов)	$с^{-1}$
	III. Механика	
Плотность	*Килограмм на кубический метр* равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме один кубический метр равна одному килограмму	$кг/м^3$
Удельный объем	*Кубический метр на килограмм* равен удельному объему однородного вещества, объем которого при массе один килограмм равен одному кубическому метру	$м^3/кг$
Количество движения (импульс)	*Килограмм-метр в секунду* равен количеству движения материальной точки массой один килограмм, движущейся со скоростью один метр в секунду	кг·м/с
Момент количества движения (момент импульса)	*Килограмм-метр в квадрате на секунду* равен моменту количества движения материальной точки, движущейся по окружности радиусом один метр и имеющей количество движения один килограмм-метр в секунду	$кг \cdot м^2/с$
Момент инерции	*Килограмм-метр в квадрате* равен моменту инерции материальной точки массой один килограмм, находящейся на расстоянии один метр от оси вращения	$кг \cdot м^2$
Сила, сила тяжести, вес	*Ньютон* равен силе, придающей телу массой один килограмм ускорение один метр на секунду в квадрате в направлении действия силы	Н
Момент силы, момент пары сил	*Ньютон-метр* равен моменту силы, равной одному ньютону, относительно точки, расположенной на расстоянии один метр от линии действия силы	Н·м
Импульс силы	*Ньютон-секунда* равна импульсу силы, равной одному ньютону и действующей в течение одной секунды	Н·с
Давление, напряжение, (нормальное, касательное), модуль (сдвига, объемного сжатия, продольной упругости)	*Паскаль* равен давлению, вызываемому силой один ньютон, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью один квадратный метр	Па
Динамическая вязкость	*Паскаль-секунда* равна динамической вязкости среды, касательное напряжение в которой при ламинарном течении и при разности скоростей слоев, находящихся на	Па·с

Продолжение

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
	расстоянии один метр по нормали к направлению скорости, равной одному метру в секунду, равно одному паскалю	
Поверхностное натяжение	*Ньютон на метр* равен поверхностному натяжению жидкости, создаваемому силой один ньютон, приложенной к участку контура свободной поверхности длиной один метр и действующей нормально к контуру и по касательной к поверхности	Н/м
Работа, энергия	*Джоуль* равен работе силы один ньютон, перемещающей тело на расстояние один метр в направлении действия силы	Дж
Мощность	*Ватт* равен мощности, при которой работа один джоуль производится за время одна секунда	Вт
	IV. Теплота	
Температура Цельсия	*Градус Цельсия* по размеру равен кельвину	°С
Температурный коэффициент	*Кельвин в минус первой степени* равен температурному коэффициенту относительного изменения физической величины, при котором изменение температуры на один кельвин от принятой за начальную вызывает относительное изменение этой величины, равное единице	$К^{-1}$
Температурный градиент	*Кельвин на метр* равен температурному градиенту поля, в котором на участке длиной один метр в направлении градиента температура изменяется на один кельвин	К/м
Теплота, количество теплоты	*Джоуль* равен количеству теплоты, эквивалентному работе один джоуль	Дж
Тепловой поток	*Ватт* равен тепловому потоку, эквивалентному мощности один ватт	Вт
Поверхностная плотность теплового потока	*Ватт на квадратный метр* равен поверхностной плотности теплового потока один ватт, равномерно распределенного по поверхности площадью один квадратный метр	$Вт/м^2$
Теплопроводность	*Ватт на метр-кельвин* равен теплопроводности вещества, в котором при стационарном режиме с поверхностной плотностью теплового потока один ватт на квадратный метр устанавливается температурный градиент один кельвин на метр	Вт/(м·К)
Теплоемкость	*Джоуль на кельвин* равен теплоемкости системы, температура которой повышается на один кельвин при подведении к системе количества теплоты один джоуль	Дж/К

Продолжение

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Удельная теплоемкость	*Джоуль на килограмм-кельвин* равен удельной теплоемкости вещества, имеющей при массе один килограмм теплоемкость один джоуль на кельвин	Дж/(кг·К)
Удельная газовая постоянная	*Джоуль на килограмм-кельвин* равен удельной газовой постоянной идеального газа массой один килограмм, совершающего при повышении температуры на один кельвин и при постоянном давлении работу один джоуль	Дж/(кг·К)
Теплота фазового превращения	*Джоуль* равен количеству теплоты, эквивалентному работе один джоуль	Дж
Удельная теплота фазового превращения	*Джоуль на килограмм* равен удельному количеству теплоты системы, в которой веществу массой один килограмм сообщается (или отбирается от него) количество теплоты один джоуль	Дж/кг
V. Электричество и магнетизм		
Количество электричества	*Кулон* равен количеству электричества, проходящему через поперечное сечение проводника при токе силой один ампер за время одна секунда	Кл
Напряженность электрического поля	*Вольт на метр* равен напряженности однородного электрического поля, создаваемой разностью потенциалов один вольт между точками, находящимися на расстоянии один метр на линии напряженности поля	В/м
Электрическое напряжение	*Вольт* равен электрическому напряжению, вызывающему в электрической цепи постоянный ток силой один ампер при мощности один ватт	В
Электрический потенциал; разность электрических потенциалов; электродвижущая сила	*Вольт*	В
Электрическое смещение	*Кулон на квадратный метр* равен электрическому смещению, при котором поток электрического смещения сквозь поперечное сечение площадью один квадратный метр равен одному кулону	$Кл/м^2$
Электрическая емкость	*Фарад* равен емкости конденсатора, напряжение между обкладками которого один вольт при заряде один кулон	Ф
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	*Фарад на метр* равен абсолютной диэлектрической проницаемости среды, в которой напряженность электрического поля один вольт на метр создает электрическое смещение один кулон на квадратный метр	Ф/м

Продолжение

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Электрический момент диполя	*Кулон-метр* равен электрическому моменту диполя, заряды которого, равные каждый одному кулону, расположены на расстоянии один метр один от другого	Кл·м
Плотность электрического тока	*Ампер на квадратный метр* равен плотности равномерно распределенного по поперечному сечению площадью один квадратный метр электрического тока силой один ампер	$А/м^2$
Напряженность магнитного поля	*Ампер на метр* равен напряженности магнитного поля в центре длинного соленоида с равномерно распределенной обмоткой, по которой проходит ток силой, равной одной n-й части единицы силы тока ампер, где n — число витков на участке длиной один метр	А/м
Магнитная индукция	*Тесла* равен магнитной индукции, при которой через поперечное сечение площадью один квадратный метр проходит магнитный поток один вебер	Тл
Магнитный поток	*Вебер* равен магнитному потоку, при убывании которого до нуля в сцепленной с ним электрической цепи сопротивлением один ом через поперечное сечение проводника проходит количество электричества один кулон	Вб
Индуктивность	*Генри* равен индуктивности электрической цепи, с которой при силе постоянного тока в ней один ампер сцепляется магнитный поток один вебер	Гн
Абсолютная магнитная проницаемость	*Генри на метр* равен абсолютной магнитной проницаемости среды, в которой напряженность магнитного поля один ампер на метр создает магнитную индукцию один тесла	Гн/м
Магнитный момент	*Ампер-квадратный метр* равен магнитному моменту электрического тока силой один ампер, проходящего по контуру площадью один квадратный метр	$А·м^2$
Намагниченность (интенсивность намагничивания)	*Ампер на метр* равен намагниченности, при которой вещество объемом один кубический метр имеет магнитный момент один ампер на квадратный метр	А/м
Электрическое сопротивление	*Ом* равен сопротивлению проводника, между концами которого возникает напряжение один вольт при силе постоянного тока один ампер	Ом
Электрическая проводимость, активная	*Сименс* равен электрической проводимости проводника сопротивлением один ом	См

Продолжение

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Удельное электрическое сопротивление	*Ом-метр* равен удельному электрическому сопротивлению проводника площадью поперечного сечения один квадратный метр и длиной один метр, имеющего сопротивление один ом	Ом·м
Удельная электрическая проводимость	*Сименс на метр* равен удельной электрической проводимости проводника, который при площади поперечного сечения один квадратный метр и длине один метр имеет электрическую проводимость один сименс	См/м
Электромагнитная энергия	*Джоуль* равен электромагнитной энергии, эквивалентной работе один джоуль	Дж
VI. Электромагнитное излучение (свет)		
Энергия излучения	*Джоуль* равен энергии излучения, эквивалентной работе один джоуль	Дж
Поток излучения, мощность излучения	*Ватт* равен потоку излучения, эквивалентному механической мощности один ватт	Вт
Поверхностная плотность потока излучения Энергетическая светимость (излучательность) Энергетическая освещенность (облученность)	*Ватт на квадратный метр* равен поверхностной плотности потока излучения, при которой поверхность площадью один квадратный метр излучает (или поглощает) поток излучения один ватт	$Вт/м^2$
Энергетическая сила света (сила излучения)	*Ватт на стерадиан* равен электрической силе света точечного источника, излучающего в телесном угле один стерадиан поток излучения один ватт	Вт/ср
Энергетическая яркость (лучистость)	*Ватт на стерадиан-квадратный метр* равен энергетической яркости равномерно излучающей плоской поверхности площадью один квадратный метр в перпендикулярном к ней направлении при энергетической силе света один ватт на стерадиан	$Вт/(ср·м^2)$
Световой поток	*Люмен* равен световому потоку, испускаемому точечным источником в телесном угле один стерадиан при силе света одна кандела	лм
Световая энергия	*Люмен-секунда* равен световой энергии светового потока в один люмен, действующего в течение одной секунды	лм·с
Яркость	*Кандела на квадратный метр* равна яркости светящейся поверхности площадью один квадратный метр при силе света одна кандела	$кд/м^2$

Продолжение

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
Светимость	*Люмен на квадратный метр* равен светимости поверхности площадью один квадратный метр, испускающей световой поток один люмен	лм/м^2
Освещенность	*Люкс* равен освещенности поверхности площадью один квадратный метр при падающем на нее световом потоке один люмен	лк
VII. Акустика		
Период звуковых колебаний	*Секунда*	с
Частота звуковых колебаний	*Герц*	Гц
Звуковое давление	*Паскаль*	Па
Длина волны	*Метр*	м
Скорость колебания частицы	*Метр в секунду*	м/с
Скорость звука	*Метр в секунду*	м/с
Звуковая энергия	*Джоуль*	Дж
Плотность звуковой энергии	*Джоуль на кубический метр* равен плотности звуковой энергии в канале объемом один кубический метр при звуковой энергии один джоуль	Дж/м^3
Поток звуковой энергии; звуковая мощность	*Ватт*	Вт
Интенсивность звука	*Ватт на квадратный метр* равен интенсивности звука в канале при потоке звуковой энергии один ватт и площади поперечного сечения один квадратный метр	Вт/м^2
VIII. Физическая химия и молекулярная физика		
Молярная масса	*Килограмм на моль* равен молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества один моль массу один килограмм	кг/моль
Молярный объем	*Кубический метр на моль* равен молярному объему вещества, занимающего при количестве вещества один моль объем один кубический метр	м^3/моль
Молярная теплоемкость	*Джоуль на моль-кельвин* равен молярной теплоемкости вещества, имеющего при количестве вещества один моль теплоемкость один джоуль на кельвин	Дж/(моль·К)
Массовая концентрация	*Килограмм на кубический метр* равен концентрации раствора, в котором содержится растворенное вещество массой один	кг/м^3

Продолжение

Наименование величины	Наименование единицы и определение	Обозначение единицы
	килограмм в объеме один кубический метр раствора	
Коэффициент диффузии	*Квадратный метр на секунду* равен коэффициенту диффузии, при котором через плоскость площадью один квадратный метр за время одна секунда переносится вещество массой один килограмм при градиенте плотности один килограмм на метр в четвертой степени	$м^2/с$
Проводимость электролита	*Сименс на метр* равен проводимости электролита, который при площади поперечного сечения один квадратный метр и длине один метр имеет электрическую проводимость один сименс	См/м
Подвижность ионов	*Квадратный метр на вольт-секунду* равен подвижности, при которой под действием электрического поля напряженностью один вольт на метр устанавливается упорядоченное движение ионов (или электронов) со скоростью один метр в секунду	$м^2/(В \cdot с)$

Глава I

Механика

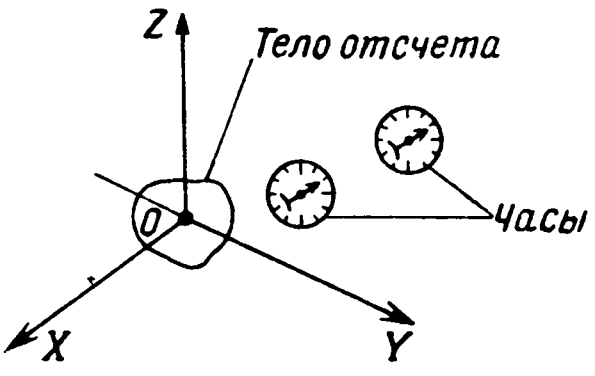


Рис. 1.1

В механике изучается простейший вид движения — изменение положения тел относительно друг друга или их отдельных частей; такое движение называется *механическим*. Тело, относительно которого определяется положение других (движущихся) тел, называется *телом отсчета*. Тело отсчета, связанная с ним система координат и синхронизированные между собой часы образуют *систему отсчета* (рис. 1.1).

1. Кинематика

Описание механического движения

В кинематике изучается механическое движение, но не рассматриваются причины этого движения. Тело, размерами которого можно пренебречь при изучении данного механического движения, называется *материальной точкой*.
Линия, вдоль которой движется материальная точка, называется *траекторией*.

Векторный способ

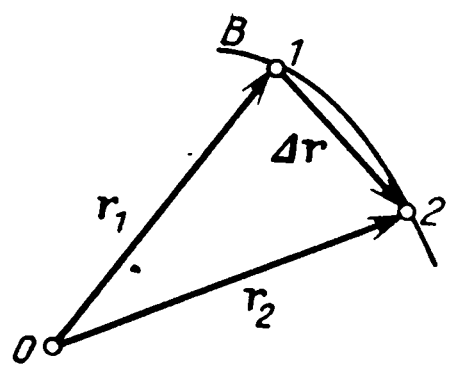


Рис. 1.2

Положение точки B определяется радиусом-вектором $\mathbf{r}_1$, проведенным из точки O выбранной системы отсчета (рис. 1.2). За промежуток времени Δt точка B перемещается из позиции *1* в позицию *2*, при этом положение точки B будет определяться радиусом-вектором $\mathbf{r}_2$. Разностью векторов $\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ определяется изменение положения точки.

Прямоугольная система координат

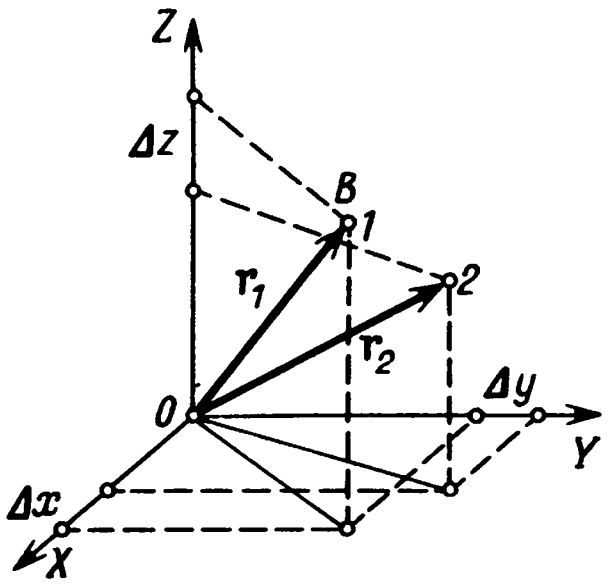


Рис. 1.3

Положение точки B определяется проекциями радиуса-вектора $\mathbf{r}$ на координатные оси (рис. 1.3). Изменение положения материальной точки при движении определяется изменением радиуса-вектора $\Delta\mathbf{r}$, т. е. изменениями его проекций Δx, Δy, Δz.

Дуговые координаты

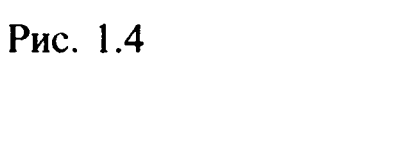


Рис. 1.4

Положение точки B определяется дуговой координатой l, которая равна расстоянию OB, проходимому точкой по траектории от начала отсчета в точке O (рис. 1.4). Изменение положения материальной точки при движении определяется изменением дуговой координаты $l_2 - l_1 = \Delta l$.

Полярные координаты

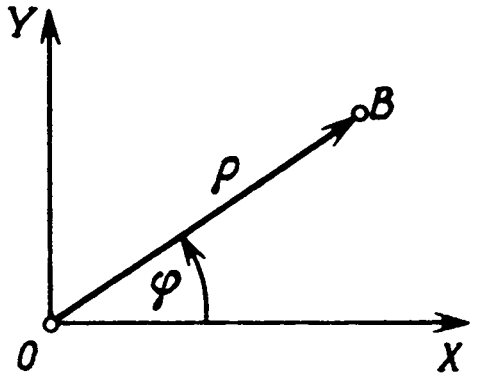


Рис. 1.5

Положение материальной точки B при движении по окружности определяется в полярной системе координат, т. е. модулем радиуса-вектора $\boldsymbol{\rho}$, проведенного из полюса O (рис. 1.5), и углом φ, который отсчитывается от оси OX против хода часовой стрелки.
В этом случае дуговая координата $l = \rho\varphi$ (угол φ определяется в радианах).

2. Кинематические величины

Перемещение (рис. 1.2)
$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1. \qquad (1.1)$$

Путь
$$\Delta l = l_2 - l_1. \qquad (1.2)$$

Средняя скорость
$$\mathbf{v}_{ср} = \Delta\mathbf{r}/\Delta t, \qquad (1.3\,а)$$
$\Delta\mathbf{r}$ – перемещение за время Δt.

Мгновенная скорость

$$\mathbf{v}=\lim_{\Delta t\to 0}(\Delta\mathbf{r}/\Delta t)=d\mathbf{r}/dt. \qquad (1.3\text{б})$$

Среднее ускорение

$$\mathbf{a}_{ср}=\Delta\mathbf{v}/\Delta t, \qquad (1.4\text{а})$$

$\Delta\mathbf{v}$ — изменение скорости за время Δt.

Ускорение

$$\mathbf{a}=\lim_{\Delta t\to 0}(\Delta\mathbf{v}/\Delta t). \qquad (1.4\text{б})$$

Проекции скорости по координатным осям

$$v_x=dx/dt,\quad v_y=dy/dt,\quad v_z=dz/dt. \qquad (1.5)$$

Проекции ускорения

$$a_x=dv_x/dt,\quad a_y=dv_y/dt,\quad a_z=dv_z/dt. \qquad (1.6)$$

Модуль вектора скорости

$$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}. \qquad (1.7)$$

Модуль вектора ускорения

$$a=\sqrt{a_x^2+a_y^2+a_z^2}. \qquad (1.8)$$

Вектор мгновенной скорости

Направлен по касательной к траектории. Модуль этого вектора

$$v=\lim_{\Delta t\to 0}(\Delta l/\Delta t)=dl/dt, \qquad (1.9)$$

Δl — изменение дуговой координаты.

На рис. 1.6 изображены положения векторов $\mathbf{v}$ в различных точках траектории. На рис. 1.7 указаны изменения вектора $\Delta\mathbf{v}$, а также его нормальной $\Delta\mathbf{v}_n$ и тангенциальной $\Delta\mathbf{v}_\tau$ составляющих.

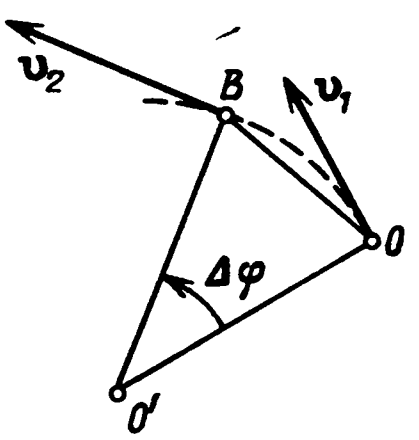


Рис. 1.6

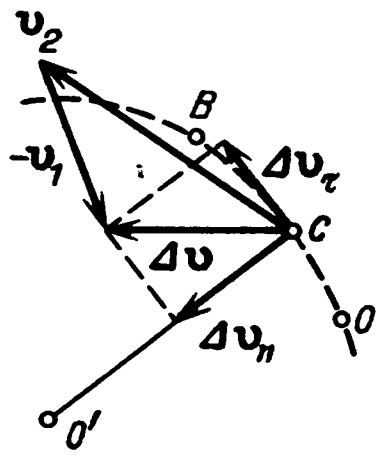


Рис. 1.7

Тангенциальное ускорение

Составляющая вектора ускорения, направленная по касательной к траектории; модуль тангенциального ускорения

$$a_\tau=dv_\tau/dt. \qquad (1.10)$$

Нормальное ускорение

Составляющая вектора ускорения, направленная перпендикулярно касательной к траектории.

Модуль нормального ускорения

$$a_n = v^2/\rho, \qquad (1.11)$$

ρ — радиус кривизны траектории в точке C, равный радиусу окружности, проходящей через три точки BCO, расположенные на траектории на бесконечно малом расстоянии друг от друга (рис. 1.7).

Ускорение (полное ускорение)

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \qquad (1.12)$$

Угол поворота радиуса-вектора (рис. 1.6)

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1. \qquad (1.13)$$

Средняя угловая скорость

$$\omega_{ср} = \Delta\varphi/\Delta t, \qquad (1.14)$$

Δt — время, за которое совершается поворот на угол $\Delta\varphi$.

Угловая (мгновенная) скорость

$$\boldsymbol{\omega} = \lim_{\Delta t \to 0} (\Delta\boldsymbol{\omega}/\Delta t) = d\boldsymbol{\varphi}/dt. \qquad (1.15)$$

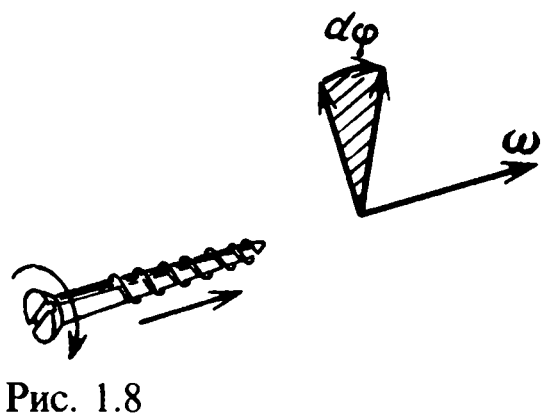


Рис. 1.8

Направление вектора $\boldsymbol{\omega}$ определяется по *правилу правого винта*: если головку винта вращать по направлению смещения точки, то его поступательное перемещение будет соответствовать направлению вектора угловой скорости (рис. 1.8).

Период обращения

Время полного оборота вокруг оси

$$T = 2\pi/\omega. \qquad (1.16)$$

Угловое ускорение

$$\boldsymbol{\beta} = \lim_{\Delta t \to 0} (\Delta\boldsymbol{\omega}/\Delta t) = d\boldsymbol{\omega}/dt, \qquad (1.17)$$

($\Delta\boldsymbol{\omega}$ — изменение угловой скорости за время Δt). Вектор углового ускорения совпадает по направлению с вектором угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$, если модуль угловой скорости увеличивается; в противном случае направления векторов $\boldsymbol{\beta}$ и $\boldsymbol{\omega}$ противоположны.

Единицы, их обозначения

Перемещение, путь — метр, м.
Скорость — метр в секунду, м/с.
Ускорение — метр на секунду в квадрате, м/с^2.

Угловая скорость — радиан в секунду, рад/с.
Угловое ускорение — радиан на секунду в квадрате, рад/с^2.
Период обращения — секунда, с.

3. Основные уравнения кинематики материальной точки

Равномерное прямолинейное движение	Равномерное движение по окружности радиусом R
Скорость $\mathbf{v}=\text{const}$, $v=s/t$ (1.18)	Угловая скорость $\omega=\text{const}$, $\omega=\varphi/t$ (1.20) Модуль линейной скорости $v_л=R\omega$, (1.20а) вектор $\mathbf{v}_л$ направлен по касательной к окружности.
Ускорение $\mathbf{a}=0$	Угловое ускорение $\boldsymbol{\beta}=0$ Модуль нормального ускорения, которое называется в этом случае центростремительным ускорением, $a_ц=v^2/R$ (1.21)
Путь, проходимый материальной точкой за время Δt, $\Delta s=\lvert\Delta\mathbf{r}\rvert=v\Delta t$ (1.19)	Угол поворота за время Δt $\Delta\varphi=\omega\Delta t$ (1.22) Путь, проходимый по дуге окружности материальной точкой за время Δt, $\Delta s=R\omega\Delta t=v_л\Delta t$ (1.23)
Ускорение $\mathbf{a}=\text{const}$	Угловое ускорение $\beta=\text{const}$ Линейное ускорение $a=\beta R$ (1.26а)

Продолжение

Равномерное прямолинейное движение	Равномерное движение по окружности радиусом R
Скорость (по определению) $\mathbf{v}=d\mathbf{r}/dt$	Угловая скорость (по определению) $\boldsymbol{\omega}=d\boldsymbol{\varphi}/dt$
Скорость в момент времени t $v_t=v_0\pm at$ (1.24) (v_0 — скорость в момент времени $t=0$)	Угловая скорость в момент времени t $\omega_t=\omega_0\pm\beta t$ (1.26б) (ω_0 — угловая скорость в момент времени $t=0$)
Путь, пройденный материальной точкой за время t, $s=v_0t\pm at^2/2$ (1.25)	Угловая координата в момент времени t $\varphi_t=\omega_0t\pm\beta t^2/2$ (1.27)

Примечание. Минус относится к равнозамедленному движению.

4. Траектории тел в поле тяготения Земли

Начальная скорость v_0	Траектория (см. рис. 1.9)
$v_0=v_1=\sqrt{Rg}=7{,}93$ км/с (R — радиус Земли, g — ускорение свободного падения); v_1 называется первой космической скоростью	Окружность (кривая *1*)
$v_0=v_2=v_1\sqrt{2}=11{,}16$ км/с; v_2 называется второй космической скоростью (или скоростью убегания)	Парабола (относительно Земли); тело не возвращается на Землю, но остается спутником Солнца (кривая *2*)
Скорость v_0 находится в пределах $v_1<v_0<v_2$	Эллипс, ближайший фокус которого расположен в центре Земли O (кривая *3*)
$v_0>v_2$	Гипербола (кривая *4*)

Продолжение

Начальная скорость v_0	Траектория (см. рис. 1.9)
$v_0 < v_1$	Эллипс, дальний фокус которого совпадает с центром Земли O (кривая 5)
$v_0 \ll v_1$	Участки эллиптической траектории можно рассматривать как параболы (рис. 1.10)

Примечание. 1. Для Луны $v_1 = 1{,}68$ км/с, $v_2 = 2{,}375$ км/с; для Венеры $v_2 = 10{,}4$ км/с, для Марса $v_2 = 5{,}0$ км/с.

2. Если $v_0 = v_3 = \sqrt{2\gamma M_C / R_C} = 42{,}1$ км/с (γ — гравитационная постоянная, M_C — масса Солнца, R_C — расстояние между Солнцем и Землей), то тело уходит за пределы Солнечной системы, при этом траектория движения — парабола (относительно Солнца); v_3 называется третьей космической скоростью.

3. При расчетах траекторий предполагалось, что v_0 имеет горизонтальное направление, а масса тела значительно меньше массы Земли.

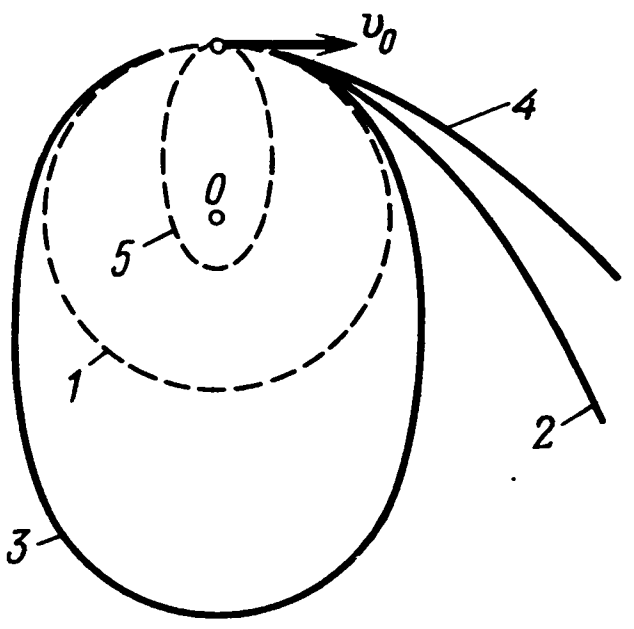


Рис. 1.9

5. Движение тел с малыми скоростями

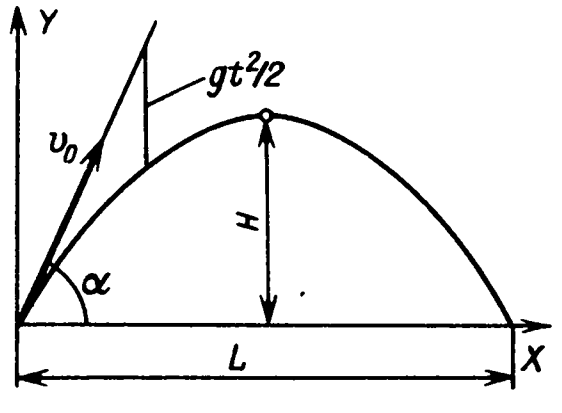


Рис. 1.10

Если начальная скорость тела $v_0 \ll v_1$, то ускорение свободного падения **g** можно считать постоянным (по модулю и направлению), а небольшой участок поверхности Земли — плоскостью. Координаты тела относительно неподвижной инерциальной системы отсчета определяются следующими уравнени-

ями (α — угол между $\mathbf{v}_0$ и горизонтальной плоскостью (рис. 1.10)):

$$x = v_0 t \cos\alpha, \tag{1.28}$$

$$y = v_0 t \sin\alpha - gt^2/2. \tag{1.29}$$

Дальность полета L и наибольшая высота подъема H рассчитываются (без учета сопротивления воздуха) по формулам:

$$L = v_0^2 \sin(2\alpha)/g, \tag{1.30}$$

$$H = v_0^2 \sin^2\alpha/(2g). \tag{1.31}$$

Наибольшая дальность полета (при постоянном значении v_0) достигается при $\alpha = \pi/2$. При наличии сопротивления дальность полета и высота подъема уменьшаются в 1,5—2 раза.

6. Законы динамики

Сила

Мерой действия на тело других тел или полей является величина, которая называется силой. Сила — векторная величина; она определяется модулем, направлением и точкой приложения O (рис. 1.11).

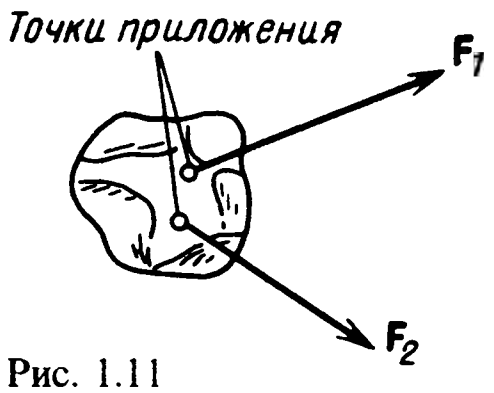


Рис. 1.11

Виды сил

Из четырех видов фундаментальных (основных) взаимодействий — гравитационного, электромагнитного, слабого и сильного — в механике в основном изучаются гравитационные и электромагнитные; однако обычно указываются конкретные виды сил, проявляющиеся при определенных условиях. Например, сила земного притяжения, сила гравитационного взаимодействия двух материальных точек относятся к гравитационному взаимодействию; силы, действующие

между заряженными частицами, взаимодействие проводников, обусловленное протекающими по ним электрическими токами, упругие силы, силы трения относятся к электромагнитному взаимодействию.

Поле сил

Если на тело, размещаемое в различных точках пространства, действует сила, то говорят, что оно находится в поле сил.
Примеры: поле сил тяжести, поле гравитационных сил, поле гидродинамических сил, электромагнитное поле (см. гл. III) и т. д.

Инертность и масса

Свойство тела оказывать сопротивление изменению его скорости (как по модулю, так и по направлению) называется *инертностью*. Физическая величина, характеризующая инертность тела, называется *инертной массой*.
Кроме того, масса является количественной характеристикой гравитационного взаимодействия (мерой тяготения); в этом случае масса называется *гравитационной*. Из опытов следует, что инертная и гравитационная массы одного и того же тела равны.

Плотность

Масса единичного объема: $\rho = m/V$, m — масса, V — объем.

Единицы:

сила — ньютон, Н;
масса — килограмм, кг;
плотность — килограмм на кубический метр, кг/м^3.

Законы Ньютона:

Первый закон

Существуют такие системы отсчета, относительно которых тело, на которое не действуют другие тела,

движется равномерно и прямолинейно. Такие системы отсчета называются *инерциальными*. По-иному этот закон формулируется следующим образом: тело находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют силы.

Второй закон

Ускорение тела в результате действия на него силы пропорционально отношению модуля этой силы к массе; векторы ускорения и силы имеют одинаковые направления:

$$\mathbf{a} = k\mathbf{F}/m.$$

Единицы силы и массы выбирают таким образом, чтобы было $k = 1$. Тогда

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = m d\mathbf{v}/dt = d\mathbf{p}/dt, \qquad (1.32)$$

$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ — *количество движения* (или *импульс*) тела. Если на тело одновременно действуют несколько сил $\mathbf{F}_1$, $\mathbf{F}_2$, ..., $\mathbf{F}_n$, то

$$\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \ldots + \mathbf{F}_n = m\mathbf{a}. \qquad (1.33)$$

Второй закон Ньютона является основным уравнением динамики материальной точки.

Третий закон

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}. \qquad (1.34)$$

Силы, с которыми действуют друг на друга две материальные точки, равны по модулю, приложены к различным точкам и направлены в противоположные стороны вдоль прямой, соединяющей эти точки. $\mathbf{F}_{12}$ — сила, приложенная к первому телу, $\mathbf{F}_{21}$ — сила, приложенная ко второму телу.

Ускорения $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$, которые получают два тела массами m_1, m_2

при взаимодействии, определяются из соотношения

$$m_1 \mathbf{a}_1 = -m_2 \mathbf{a}_2.$$

Зависимость массы от скорости

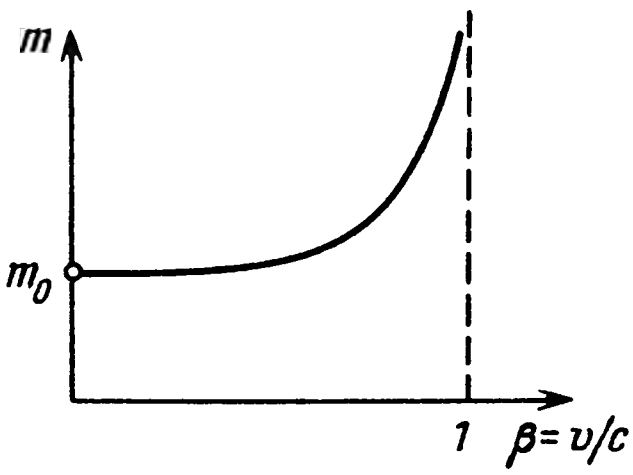


Рис. 1.12

При больших скоростях ($v \sim c$, c — скорость света в вакууме) следует учитывать зависимость массы от скорости движущегося тела (рис. 1.12):

$$m = m_0 / \sqrt{1-\beta^2}, \qquad (1.35)$$

m_0 — масса неподвижного тела (масса покоя), m — масса движущегося тела, $\beta = v/c$.

7. Динамика вращательного движения

Момент силы относительно точки

Векторная величина

$$\mathbf{M} = [\mathbf{rF}], \qquad (1.36)$$

модуль которой равен произведению модуля силы на проекцию l радиуса-вектора $\mathbf{r}$, проведенного из точки O в точку приложения силы $\mathbf{F}$, на направление, перпендикулярное направлению этой силы:

$$M = Fl = Fr \sin\beta,$$

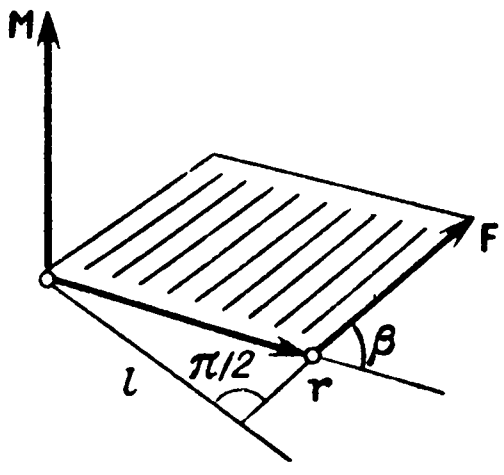


Рис. 1.13

β — угол между векторами $\mathbf{r}$ и $\mathbf{F}$ (рис. 1.13).

Момент силы относительно оси

Скалярная величина, равная проекции момента силы на ось вращения.

Момент количества движения (импульса) относительно точки

Векторная величина

$$\mathbf{L} = [\mathbf{rp}], \qquad (1.37)$$

модуль которой равен произведению модуля количества движения (импульса) на проекцию l радиуса-вектора $\mathbf{r}$ на направление, перпендикулярное вектору скорости

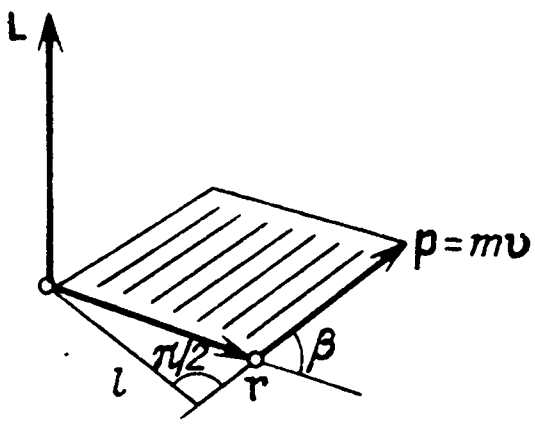


Рис. 1.14

(импульса):

$L = mvr \sin\beta,$

β — угол между векторами **r** и $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ (рис. 1.14).

Момент инерции материальной точки

Скалярная величина

$$I = mr^2, \qquad (1.38)$$

m — масса материальной точки, r — ее расстояние от оси вращения.

Момент количества движения (импульс) относительно оси

Скалярная величина, равная проекции момента импульса **L** на ось вращения.

Уравнения динамики вращательного движения

$$\mathbf{M} = \lim_{\Delta t \to \infty} \frac{\Delta \mathbf{L}}{\Delta t}. \qquad (1.39)$$

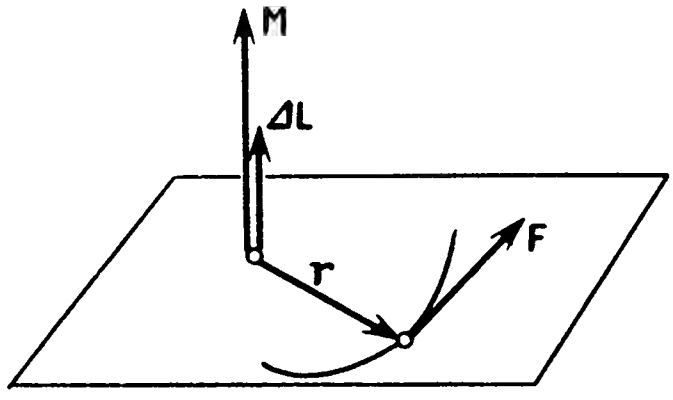


Рис. 1.15

Основное уравнение динамики вращательного движения материальной точки (уравнение моментов). $\Delta \mathbf{L}$ — изменение момента количества движения (импульса) за время Δt (рис. 1.15).

$$I\beta_z = M_z. \qquad (1.40)$$

Основное уравнение динамики вращения твердого тела вокруг неподвижной оси.

I — момент инерции тела относительно оси вращения, равный сумме моментов инерции материальных точек:

$$I = \sum_i m_i r_i^2;$$

M_z — алгебраическая сумма моментов внешних сил, β_z — проекция углового ускорения на ось Oz (рис. 1.16)

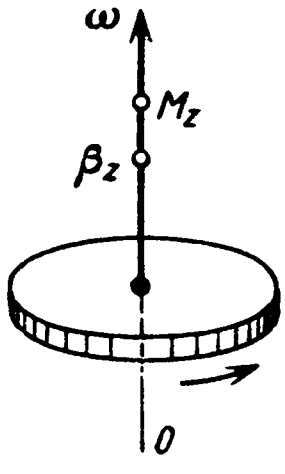
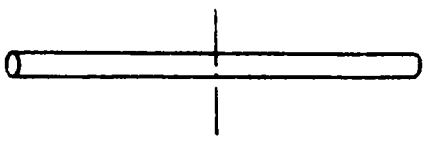
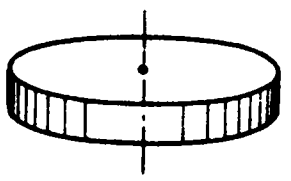
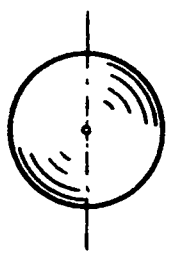
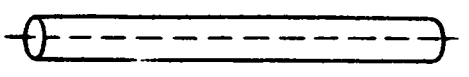
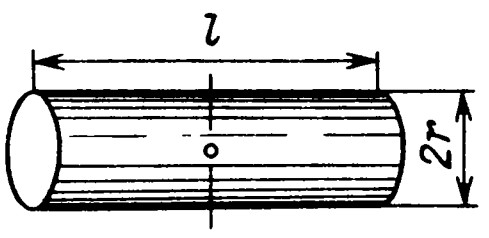
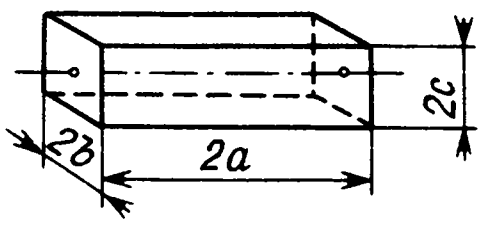


Рис. 1.16

8. Моменты инерции однородных тел

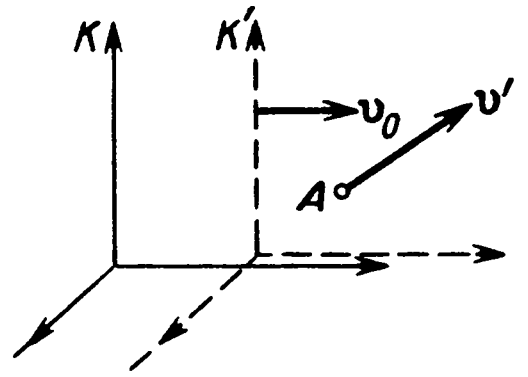
Тело	Относительно оси	$I_ц$	
Тонкий стержень длины l 	перпендикулярной стержню и проходящей через его середину	$ml^2/12$	(1.41)
Круглый диск или цилиндр радиуса r 	перпендикулярной плоскости диска и проходящей через его центр	$mr^2/2$	(1.42)
Шар радиуса r 	совпадающей с диаметром	$2mr^2/5$	(1.43)
Тонкая труба или кольцо радиуса r 	совпадающей с осью трубы	mr^2	(1.44)
Круглый цилиндр длины l и радиуса r 	перпендикулярной к оси цилиндра и проходящей через его середину	$m\left(\frac{l^2}{12}+\frac{r^2}{4}\right)$	(1.45)
Прямоугольный параллелепипед с ребрами $2a$, $2b$, $2c$ 	проходящей через центр и параллельной ребру длины $2a$	$\frac{m}{3}(b^2+c^2)$	(1.46)

Примечание. В таблице даны моменты инерции тел $I_ц$ относительно осей, проходящих через их центры масс. Моменты инерции относительно осей, которые параллельны оси, проходящей через центр масс, можно рассчитать по формуле $I=I_ц+mb^2$ (b — расстояние между осями).

9. Неинерциальные системы отсчета

Система отсчета, которая перемещается с ускорением относительно инерциальной системы, называется *неинерциальной системой.*

Система K' движется поступательно с переменной скоростью $\mathbf{v}_0$ и ускорением $\mathbf{a}_0$



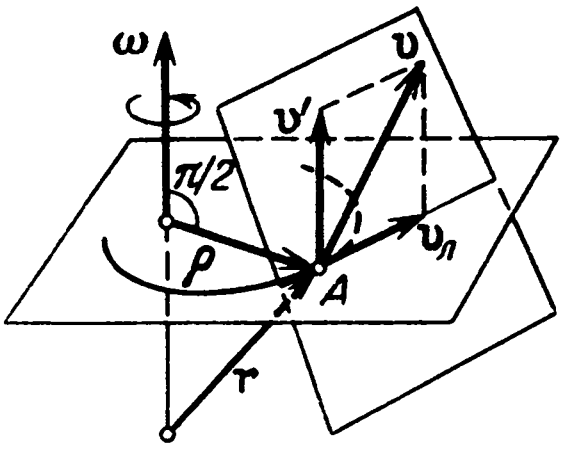
Если в системе K' скорость равна $\mathbf{v}'$, а ускорение равно $\mathbf{a}'$, то в инерциальной системе K скорость будет

$$\mathbf{v}=\mathbf{v}'+\mathbf{v}_0, \tag{1.47}$$

ускорение

$$\mathbf{a}=\mathbf{a}'+\mathbf{a}_0 \tag{1.48}$$

Система K' вращается с постоянной угловой скоростью $\boldsymbol{\omega}$ вокруг оси, которая неподвижна в инерциальной системе K



Если в системе K' скорость материальной точки A равна $\mathbf{v}'$, а ускорение равно $\mathbf{a}'$, то в инерциальной системе K скорость

$$\mathbf{v}=\mathbf{v}'+[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}], \tag{1.49}$$

$[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}]=[\boldsymbol{\omega}\boldsymbol{\rho}]=\mathbf{v}_л$ — линейная скорость материальной точки A,

$\boldsymbol{\rho}=\mathbf{r}\sin\alpha$,

ускорение

$$\mathbf{a}=\mathbf{a}'+2[\boldsymbol{\omega}\mathbf{v}']+\omega^2\boldsymbol{\rho} \tag{1.50}$$

Кориолисово ускорение

$$\mathbf{a}_{кор}=2[\boldsymbol{\omega}\mathbf{v}'] \tag{1.51}$$

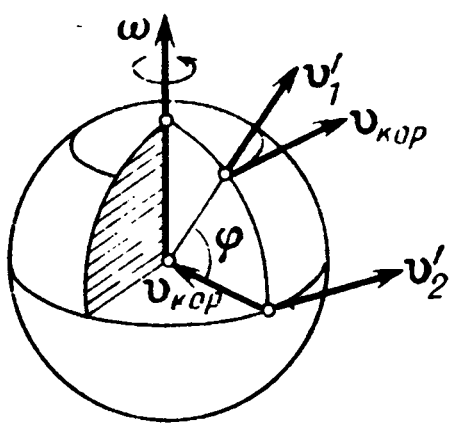
Центростремительное ускорение

$$\mathbf{a}_ц=-\omega^2\boldsymbol{\rho} \tag{1.52}$$

Если материальная точка A движется в системе K' с постоянной скоростью $\mathbf{v}'$ ($\mathbf{a}'=0$), то ускорение в системе K

$$\mathbf{a}=\mathbf{a}_{кор}+\mathbf{a}_ц \tag{1.53}$$

10. Основной закон движения тел в неинерциальных системах отсчета. Силы инерции

Неинерциальная система K' перемещается прямолинейно с ускорением a_0 относительно инерциальной системы K	$m\mathbf{a}' = \mathbf{F} - m\mathbf{a}_0$, (1.54) $\mathbf{a}'$ — ускорение в системе K', $\mathbf{a}$ — ускорение в системе K, $\mathbf{F}_и = -m\mathbf{a}_0$ (1.55) — сила инерции (поступательная сила инерции)
Неинерциальная система K' вращается вокруг оси с постоянной угловой скоростью $\boldsymbol{\omega}$ 	$m\mathbf{a}' = \mathbf{F} + m\omega^2\boldsymbol{\rho} + 2m[\mathbf{v}'\boldsymbol{\omega}]$, (1.56) $\mathbf{a}'$ — ускорение в системе K', $\mathbf{F}_{цб} = m\omega^2\boldsymbol{\rho}$ — (1.57) центробежная сила инерции; $\mathbf{F}_{кор} = 2m[\mathbf{v}'\boldsymbol{\omega}]$ — (1.58) сила Кориолиса (кориолисова сила) В общем случае $m\mathbf{a}' = \mathbf{F}_и + \mathbf{F}_{цб} + \mathbf{F}_{кор} + \mathbf{F}$. (1.59) На рисунке указаны направления силы Кориолиса, которые действуют на движущееся тело по поверхности Земли: а) при перемещении по вертикали со скоростью $\mathbf{v}'_1$; б) при перемещении по экватору со скоростью $\mathbf{v}'_2$

11. Силы трения

Силы трения	Силы, которые возникают на поверхности соприкосновения прижатых друг к другу тел при скольжении (относительном перемещении).
Трение сухое	Трение между поверхностями соприкасающихся твердых тел при отсутствии прослойки жидкости (смазки). Сухое трение подразделяется на *трение скольжения* (одно тело скользит по поверхности другого) и *трение качения* (одно тело катится по поверхности другого).
Силы трения покоя	Если внешняя сила недостаточна для относительного перемещения

тел по поверхности их соприкосновения, то возникающая при этом сила трения равна внешней силе и изменяется от нуля до некоторого максимального значения $F_м$, которое называется *силой трения покоя*. Отношение силы трения покоя к силе давления P, сжимающей соприкасающиеся тела, называется коэффициентом трения покоя:

$$f = F_м / P. \tag{1.60}$$

Силы трения скольжения

После того как начнется скольжение, сила трения несколько уменьшается по сравнению с силой трения покоя. Сила трения при скольжении называется *силой трения скольжения*. Сила трения скольжения $F_{тр}$ зависит от материала и качества обработки соприкасающихся поверхностей, от силы, сжимающей трущиеся поверхности (силы давления P). На рис. 1.17 сила давления P, распределенная по поверхности соприкосновения тел, равна силе тяжести mg.

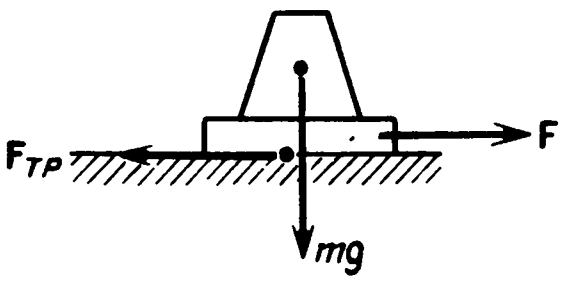


Рис. 1.17

Модуль силы трения скольжения

$$F_{тр} = fP, \tag{1.61}$$

f — коэффициент трения скольжения, зависящий от тех же факторов, что и сила трения; незначительно f зависит от относительной скорости смещения тел (этой зависимостью обычно пренебрегают).

Трение качения

Сила трения качения

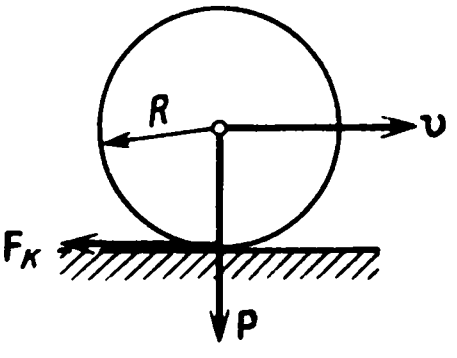


Рис. 1.18

$$F_к = f_к P / R, \tag{1.62}$$

R — радиус катящегося цилиндра, $f_к$ — коэффициент трения качения, имеющий размерность длины.

Коэффициент сцепления ψ

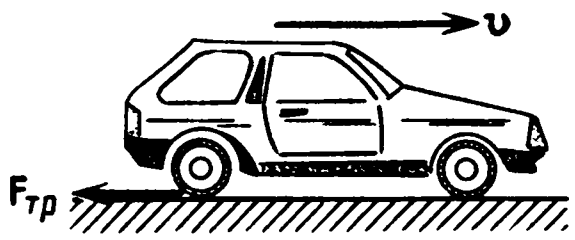


Рис. 1.19

Отношение силы трения скольжения $F_{тр}$, которая возникает при торможении между шиной автомобиля и дорожным покрытием, к силе давления P:

$$\psi = F_{тр}/P. \qquad (1.63)$$

12. Работа, мощность, энергия

При движении тел силы, действующие на них, могут изменяться как по модулю, так и по направлению.

Элементарное перемещение (элементарный участок пути)

Малый участок перемещения (или пути), в пределах которого можно считать силу постоянной.

Элементарная работа силы

Скалярная величина

$$\Delta A = F\Delta r\cos\varphi = F\Delta s\cos\varphi, \qquad (1.64)$$

Δr — элементарное перемещение, Δs — элементарный путь.

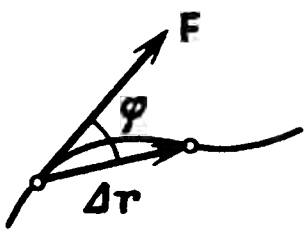


Рис. 1.20 а

Работа на конечном перемещении

$$A = \sum_{i=1}^{n} F_i\Delta s_i\cos\varphi_i, \qquad (1.65)$$

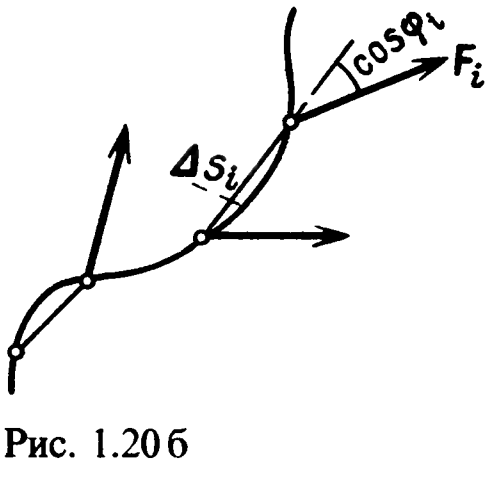


Рис. 1.20 б

n — количество элементарных участков пути, на которые разбивается конечный путь. Вообще

$$A = \int_s F\cos\varphi\, ds. \qquad (1.66)$$

Если $F = \text{const}$ и $\varphi = \text{const}$, то работа

$$A = Fs\cos\varphi, \qquad (1.67)$$

s — пройденный путь (не перемещение!).

Работа — величина алгебраическая ($A > 0$, если $\cos\varphi > 0$; $A < 0$, если $\cos\varphi < 0$).

Элементарная работа при вращательном движении

$$\Delta A_{вр} = M\Delta\varphi, \qquad (1.68)$$

$\Delta\varphi$ — угол поворота относительно неподвижной оси.

Мощность

Работа за время 1 с

$$N=\Delta A/\Delta t=Fv, \qquad (1.69)$$

ΔA — элементарная работа за время Δt, v — скорость.

Единицы:

работа, энергия — джоуль, Дж;
мощность — ватт, Вт.

Энергия

Мера различных форм движения материи и взаимодействий.
Например, силы, приложенные к телу, увеличивают энергию этого тела на величину, равную работе этих сил.

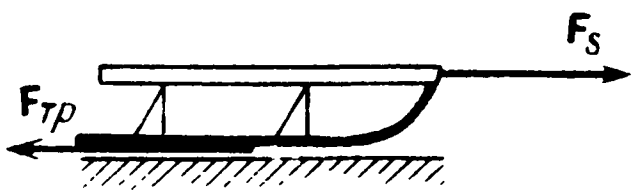


Рис. 1.21

Если санки перемещаются по горизонтальному пути с постоянной скоростью, то результирующая сила равна нулю, т. е. (см. рис. 1.21). $\mathbf{F}_s-\mathbf{F}_{тр}=0$; работа силы трения $\mathbf{F}_{тр}$ равна работе силы $\mathbf{F}_s$, которая необходима для перемещения санок, но по знаку эти работы противоположны; работа результирующей силы равна нулю, поэтому энергия санок не изменяется.

Кинетическая энергия

Энергия движущегося тела, определяемая соотношением

Рис. 1.22

$$E_к=mv^2/2, \qquad (1.70)$$

m — масса тела, v — его скорость. Изменение кинетической энергии равно работе сил.

Потенциальное поле

Поле называется потенциальным, если работа сил этого поля при перемещении тела из одной точки в другую не зависит от формы траектории, по которой перемещается тело.

Потенциальные (консервативные) силы

Силы потенциального поля называются *потенциальными* или *консервативными*.

Работа консервативных сил

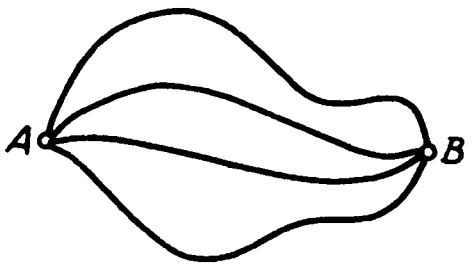


Рис. 1.23

Зависит лишь от положения (координат) начальной и конечной точки траектории (на рис. 1.23 — это точки A и B).

Потенциальная энергия тела

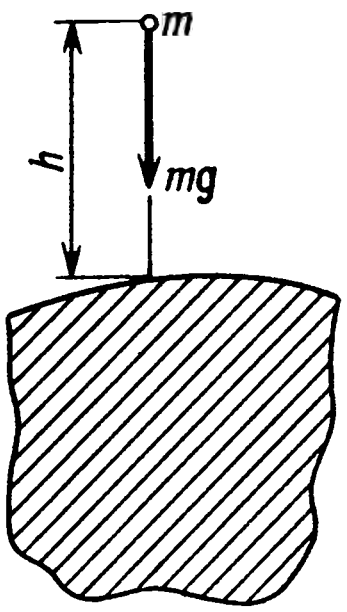


Рис. 1.24

Энергия, обусловленная взаимодействием этого тела с другими телами посредством консервативных сил (например, гравитационное взаимодействие тела с Землей). Потенциальная энергия зависит от расстояния между взаимодействующими телами. Например, при медленном перемещении в вертикальном направлении на высоту h тела массой m в поле тяготения Земли совершается внешними силами работа (рис. 1.24)

$$A = mgh, \tag{1.71}$$

при этом потенциальная энергия увеличивается на

$$\Delta U = mgh. \tag{1.72}$$

Работа силы тяжести при подъеме тела будет отрицательна.

Вообще, при перемещении тела из начального положения в конечное работа потенциальных сил равна изменению потенциальной энергии, взятому с обратным знаком:

$$\Delta A = -(U_2 - U_1), \tag{1.73}$$

U_1, U_2 — потенциальные энергии в начальном и конечном положениях, $U_2 - U_1$ — приращение энергии.

Начало отсчета потенциальной энергии выбирается произвольно; во многих случаях считают, что в поле тяготения Земли потенциальная энергия на ее поверхности равна нулю.

Потенциальная энергия при деформации

В результате работы внешних сил при деформации потенциальная энергия тела увеличивается вследствие изменения расстояния между частицами (см. п. 21 гл. I).

13. Законы сохранения в механике

Закон сохранения энергии

$$E_к + U = \text{const.} \qquad (1.74)$$

Замкнутой называется система, не взаимодействующая с внешними телами.

В инерциальных системах отсчета сумма кинетической и потенциальной энергий замкнутой системы тел, между которыми действуют лишь консервативные силы, остается постоянной.

Закон сохранения импульса (количества движения)

$$\sum_i \mathbf{p}_i = \text{const.} \qquad (1.75)$$

В инерциальных системах отсчета векторная сумма импульсов тел замкнутой системы остается постоянной.

Закон сохранения момента импульса (количества движения)

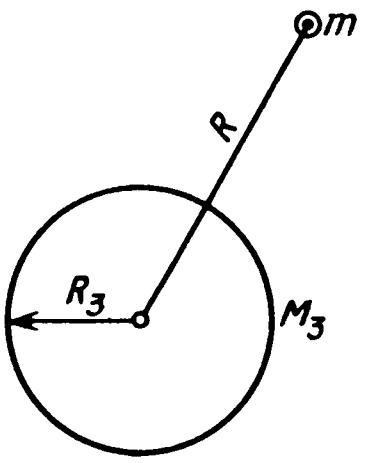
$$\sum_i \mathbf{L}_i = \text{const.} \qquad (1.76)$$

В инерциальных системах отсчета векторная сумма моментов импульсов тел замкнутой системы остается постоянной.

14. Формулы расчета кинетической и потенциальной энергии

Кинетическая или потенциальная энергия	Формулы
Кинетическая энергия: — при движении тел со скоростями $v \ll c$ (c — скорость света в вакууме);	$E_к = m_0 v^2/2$, (1.77) m_0 — масса покоя тела
— при вращении тела вокруг непод-	$E_\omega = I\omega^2/2$, (1.78)

Продолжение

Кинетическая или потенциальная энергия	Формулы
вижной оси с угловой скоростью ω;	I — момент инерции
— при движении с большими скоростями ($v \sim c$)	$E_v = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$ (1.79)
Потенциальная энергия:	
— в поле тяготения Земли	$U_т = -\gamma M_З m / R$, (1.80)
	γ — гравитационная постоянная, $M_З$ — масса Земли, m — масса тела, R — расстояние между центром Земли и центром массы тела ($R > R_З$, $R_З$ — радиус Земли)
— в однородном поле тяготения	$U = mgh$, (1.81)
	m — масса тела, g — ускорение свободного падения, h — высота над поверхностью Земли
— деформированного тела единичного объема (при продольной деформации стержня)	$U_E = \varepsilon E^2/2$, (1.82)
	ε — деформация, E — модуль Юнга (см. п. 21 этой главы)

15. Простейшие механизмы

Наклонная плоскость

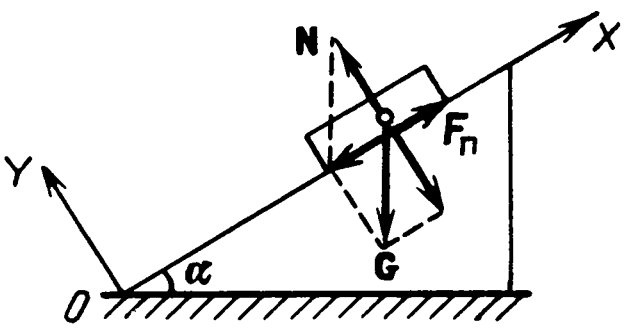


Рис. 1.25

На брусок, расположенный на наклонной плоскости, действуют: сила тяжести **G**, сила реакции опоры **N** и сила трения покоя $\mathbf{F}_п$; условие равновесия (без учета моментов сил)

$$\mathbf{G} + \mathbf{N} + \mathbf{F}_п = 0. \quad (1.83)$$

Если ось OX прямоугольной системы координат направлена параллельно наклонной плоскости, ось OY — перпендикулярно, то условие равновесия в проекциях на эти оси (см. рис. 1.25):

$$F_{\text{п}} - G\sin\alpha = 0, \quad N - G\cos\alpha = 0,$$

$$F_{\text{п}}/N = \operatorname{tg}\alpha.$$

При условии, что $G\sin\alpha > F'_{\text{п}}$ ($F'_{\text{п}}$ — максимальное значение силы трения покоя), равновесие нарушается, брусок будет смещаться вниз по наклонной плоскости.

Рычаг

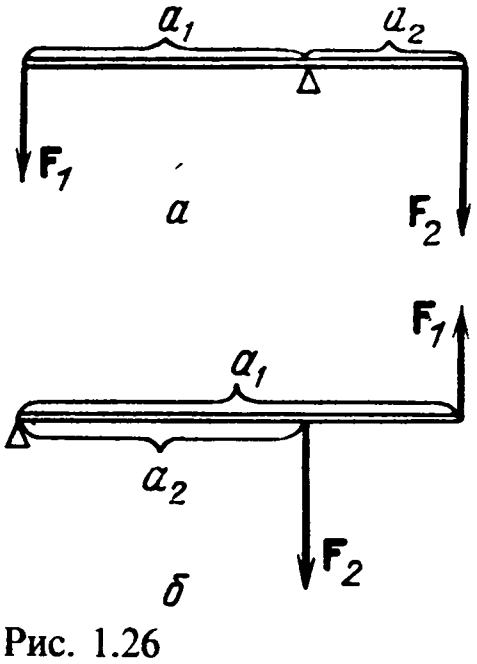


Рис. 1.26

Рычаг представляет собой стержень, который может вращаться вокруг неподвижной опоры или оси вращения. Рычаг находится в равновесии, если алгебраическая сумма действующих на него моментов сил равна нулю (рис. 1.26):

$$\mathbf{F}_1 a_1 - \mathbf{F}_2 a_2 = 0,$$

a_1 и a_2 — *плечи* сил $\mathbf{F}_1$ и $\mathbf{F}_2$. Условие равенства моментов сил применяется также к равновесию ворота или лебедки.

Блок

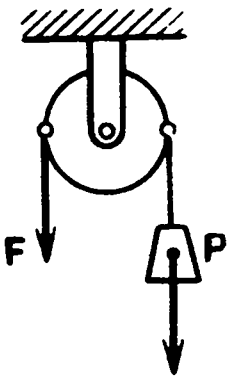


Рис. 1.27

Блок — простейший механизм в форме диска с желобом по окружности для цепи, каната, троса, нити и т. д. Неподвижный блок (рис. 1.27) служит только для изменения направления перемещения. На подвижном блоке (рис. 1.28) сумма всех действующих сил и сумма всех моментов сил равны нулю:

$$\mathbf{P} - 2\mathbf{F} = 0.$$

Отсюда следует, что $P = 2F$, $F = P/2$.

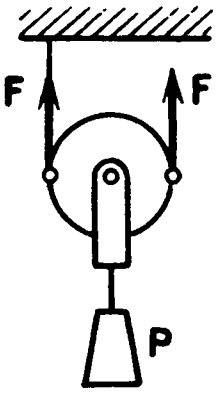


Рис. 1.28

Полиспаст

Полиспаст представляет собой систему подвижных и неподвижных блоков, укрепленных в двух держателях. Если полиспаст имеет n по-

движных и n неподвижных блоков, то для уравновешивания силы P необходимо приложить силу

$$F = P/(2n). \qquad (1.84)$$

Домкрат винтовой

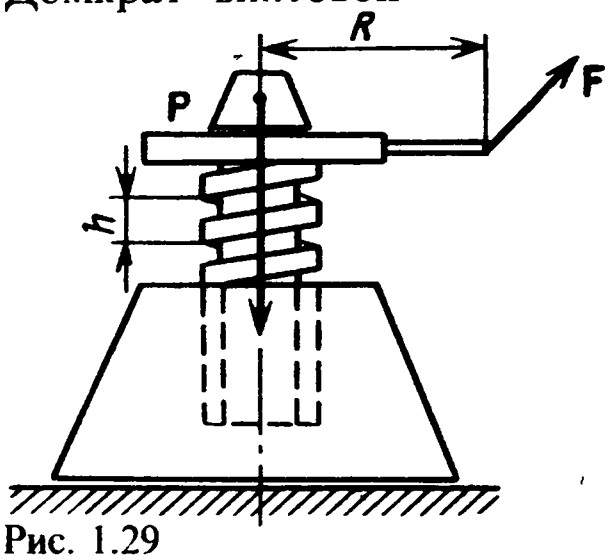


Рис. 1.29

При отсутствии трения сила **P**, действующая вдоль оси винта, уравновешивается силой **F**, приложенной к рукоятке (рис. 1.29):

$$F = Ph/(2\pi R), \qquad (1.85)$$

R — расстояние от оси вращения до точки приложения силы, h — шаг винта.

16. Закон всемирного тяготения

Закон всемирного тяготения

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{R^2}. \qquad (1.86)$$

Две материальные точки массами m_1 и m_2 притягиваются друг к другу силами

$$|F_{12}| = |F_{21}| = \gamma m_1 m_2 / R^2,$$

R — расстояние между точками, γ — гравитационная постоянная, равная $6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Н $\cdot$ м^2/кг^2.

Эти силы называются *гравитационными*, или силами тяготения. Силы тяготения направлены вдоль прямой, проведенной через материальные точки.

По формуле (1.86) можно рассчитывать силу тяготения между двумя однородными телами сферической формы, при этом R будет соответствовать расстоянию между центрами этих шаров (рис. 1.30).

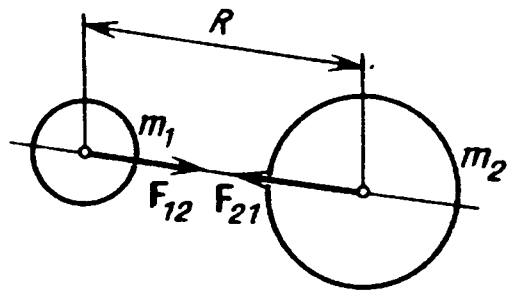


Рис. 1.30

Сила тяготения

$$F_т = \gamma m M_3 / R_3^2 \qquad (1.87)$$

— сила тяготения между телом,

расположенным на поверхности Земли, и Землей, m — масса тела, $M_З$ — масса Земли, $R_З$ — ее радиус; $\mathbf{F}_т$ направлена к центру Земли.

Сила тяжести

$$\mathbf{G}=\mathbf{F}_т+\mathbf{F}_ц. \qquad (1.88)$$

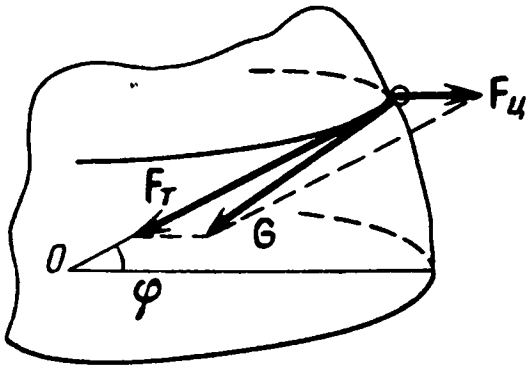


Рис. 1.31

Равнодействующая двух сил — силы тяготения $\mathbf{F}_т$ и центробежной силы инерции $\mathbf{F}_ц=m\omega^2\boldsymbol{\rho}$ (рис. 1.31). Направление **G** совпадает с направлением отвеса; на полюсах Земли $G=F_т$, на экваторе $G=F_т-F_ц$.

Вес тела

$$\mathbf{P}=\mathbf{G}-m\mathbf{a}. \qquad (1.89)$$

Сила, с которой действует на горизонтальную опору (или отвес) тело, находящееся в поле силы тяжести. **a** — ускорение тела, размещенного на опоре.

Напряженность поля тяготения $\mathbf{g}_т$

Величина, равная силе тяготения, действующей на тело единичной массы:

$$\mathbf{g}_т=\mathbf{F}_т/m. \qquad (1.90)$$

Движение планет

Планеты движутся под действием гравитационных сил, действующих между Солнцем и планетами.

Законы Кеплера

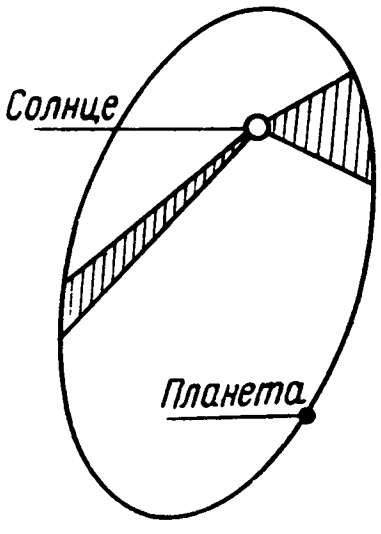


Рис. 1.32

Первый закон. Планеты движутся по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которой находится Солнце (рис. 1.32).

Второй закон. Радиус-вектор, проведенный из центра Солнца в центр планеты, описывает за равные промежутки времени одинаковые площади.

Третий закон. Отношение

$$r^3/T^2=\text{const}=3{,}36\cdot10^{-18}\ \text{м}^3/\text{с}^2$$

для всех планет Солнечной систе-

мы; r — расстояние от Солнца до планеты, T — период обращения планеты.

17. Статика твердого тела

Условия равновесия

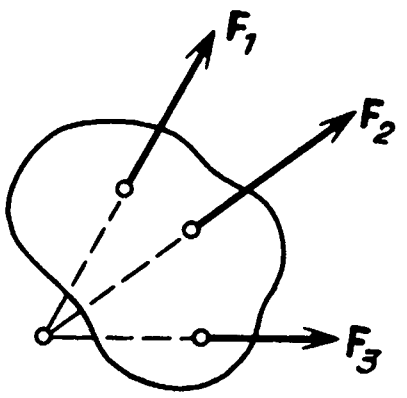


Рис. 1.33

На тело действует несколько сил, направления которых пересекаются в одной точке (рис. 1.33); в этом случае для равновесия необходимо, чтобы векторная сумма всех сил была равна нулю:

$$\sum_i \mathbf{F}_i = 0. \qquad (1.91)$$

Тело с неподвижной осью в точке O находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов относительно этой оси равна нулю:

$$\sum_i M_i = 0. \qquad (1.92)$$

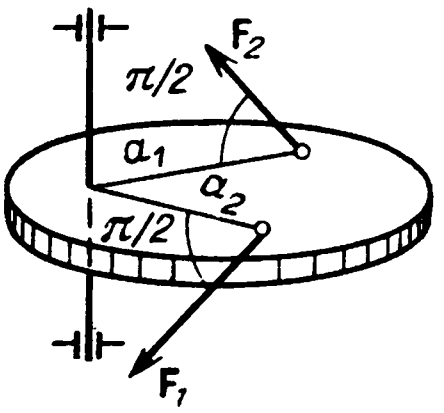


Рис. 1.34

На рис. 1.34 $M_2 = F_2 a_2$ (вращение по часовой стрелке), $M_1 = -F_1 a_1$ (вращение против часовой стрелки); условие равновесия для этого случая:

$$M_1 + M_2 = F_2 a_2 - F_1 a_1 = 0.$$

Центр масс (центр инерции)

Точка, положение которой определяется радиусом-вектором

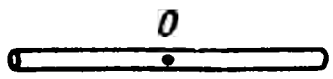
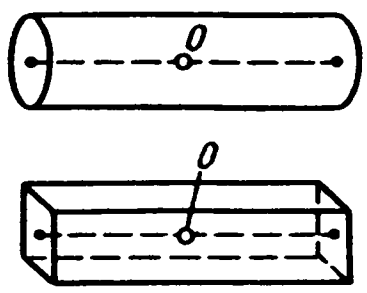
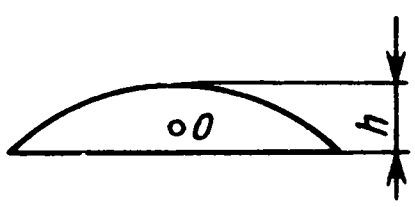
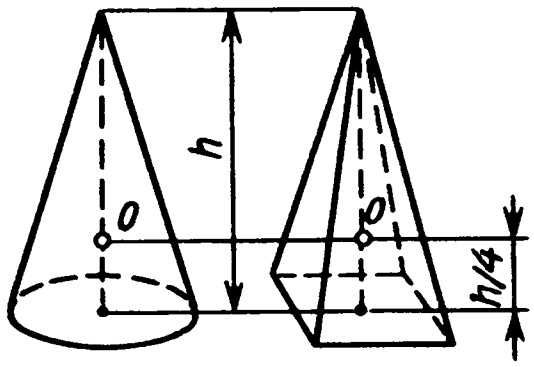
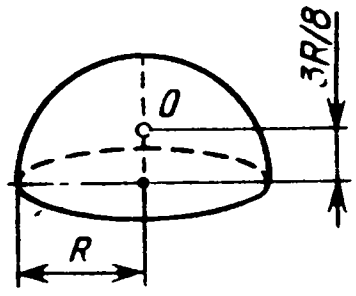
$$\mathbf{r}_C = \sum_i (m_i \mathbf{r}_i)/M, \qquad (1.93)$$

m_i и $\mathbf{r}_i$ — массы и радиусы-векторы частиц, M — масса всех частиц.

Центр тяжести

Точка, в которой приложена равнодействующая всех сил тяжести, действующих на отдельные малые объемы тела. Сумма моментов сил тяжести относительно центра тяжести равна нулю.
В однородном поле тяготения центр тяжести и центр масс совпадают.

18. Центры масс однородных тел

Тело	Положение центра тяжести
Тонкий стержень 	На середине стержня
Цилиндр или призма 	На середине прямой, соединяющей центры оснований цилиндра или призмы
Шар	В центре
Плоский сегмент малой толщины 	На оси симметрии, смещен от основания на 2/5 его высоты
Пирамида или конус 	На отрезке, соединяющем вершину с центром основания; смещен от основания на 1/4 этого отрезка
Полушарие 	На оси симметрии; смещен от центра на 3/8 радиуса

19. Деформация и силы упругости

Деформация	Изменение расстояния между точками тела под действием внешних сил.

Упругая деформация

Деформация, исчезающая после прекращения действия внешних сил.

Силы упругости

Возникающие при упругой деформации силы, которые противодействуют изменению формы и объема тела.

Напряжение (вектор напряжения)

Векторная величина, равная силе упругости, которая действует на площадь сечения 1 м^2 деформированного тела:

$$\sigma = F_y/S, \qquad (1.94)$$

F_y — сила упругости, S — площадь сечения.

Нормальное напряжение σ_n

Составляющая вектора напряжения, перпендикулярная плоскости сечения.

Продольная деформация

Отношение $\Delta l/l = \varepsilon$ (Δl — изменение длины стержня при растяжении (сжатии) стержня, l — длина стержня до деформации (рис. 1.35)).

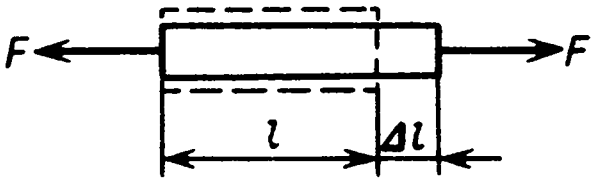


Рис. 1.35

Тангенциальное напряжение τ

Составляющая вектора напряжения, параллельная плоскости сечения.

Сдвиговая деформация γ

Отношение $\gamma = \delta/l$ (δ — смещение одной параллельной грани относительно другой под действием сдвиговых напряжений τ, l — расстояние между этими гранями до деформации).

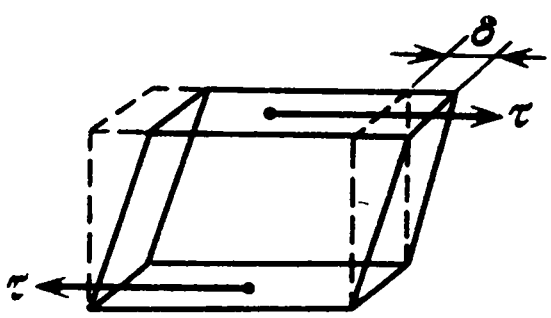


Рис. 1.36

Поперечная деформация

Отношение $\Delta d/d = \varepsilon_1$ ($\Delta d = d - d_1$ — изменение диаметра при продольной деформации, d — диаметр стержня до деформации).

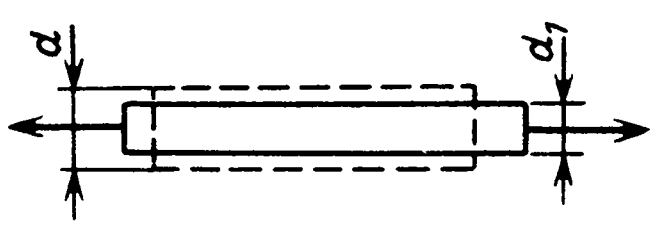


Рис. 1.37

Коэффициент Пуассона

Отношение поперечной деформации к продольной:

$$\nu = \varepsilon_1/\varepsilon. \qquad (1.95)$$

Сжимаемость

Относительное изменение объема $\Delta V/V$ при изменении давления на один паскаль:

$$\beta = \Delta V/(V\Delta p). \qquad (1.96)$$

Единицы:

деформация — безразмерная величина;
напряжение — паскаль, Па.

Закон Гука

Механические напряжения пропорциональны деформациям. Этот закон выполняется при малых деформациях.

$$\sigma_n = E\varepsilon \qquad (1.97)$$

— при продольных деформациях изотропной среды.

$$\tau = G\gamma \qquad (1.98)$$

— при деформациях сдвига изотропной среды.

$$P = K\Delta V/V \qquad (1.99)$$

— при всестороннем сжатии изотропной среды.

Модули упругости

$$E = \sigma_n/\varepsilon \text{ — модуль Юнга,}$$
$$G = \tau/\gamma \text{ — модуль сдвига,} \qquad (1.100)$$
$$K = P/(\Delta V/V) \text{ — модуль объемного сжатия.}$$

Соотношение между модулями в изотропной среде

$$E = 2G(1+\nu),$$
$$E = 3K(1-2\nu), \qquad (1.101)$$
$$K = 1/\beta.$$

Зависимость нормального напряжения от продольной деформации

На рис. 1.38 графически изображена экспериментальная зависимость σ_n от ε; $\sigma_м$ — предел прочности, т. е. напряжение, при котором на стержне получается местное суже-

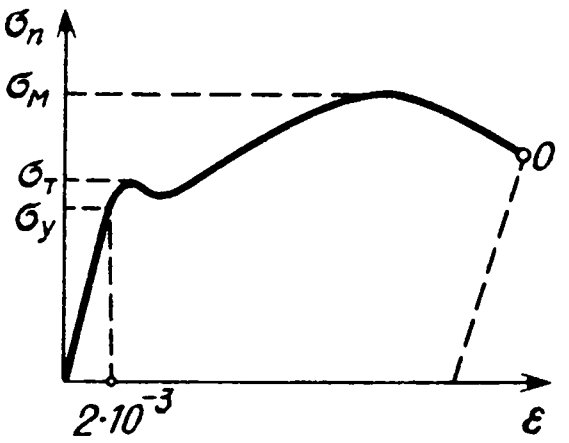


Рис. 1.38

ние (шейка), $\sigma_т$ — предел текучести, т. е. напряжение, при котором появляется текучесть (увеличение деформации без увеличения деформирующей силы), $\sigma_у$ — предел упругости, т. е. напряжение, ниже которого справедлив закон Гука; в точке *O* происходит разрушение материала.

20. Механика жидкостей и газов

Закон Паскаля

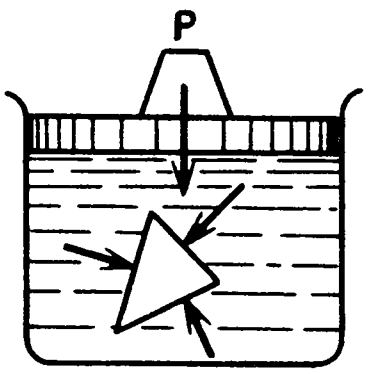


Рис. 1.39

Внешнее давление в неподвижной жидкости (газе), находящейся в замкнутом объеме, передается во все стороны равномерно; иначе — давление в неподвижной жидкости в некоторой точке одинаково во всех направлениях.

Закон Архимеда

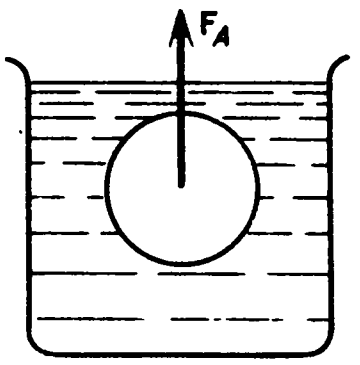


Рис. 1.40

На тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная по модулю силе тяжести вытесненной им жидкости (газа); эта сила (архимедова сила) $\mathbf{F}_A$ приложена к центру масс погруженной части тела или к центру масс всего тела, если оно погружено в жидкость полностью. Сила Архимеда направлена вертикально вверх (рис. 1.40).

Сообщающиеся сосуды

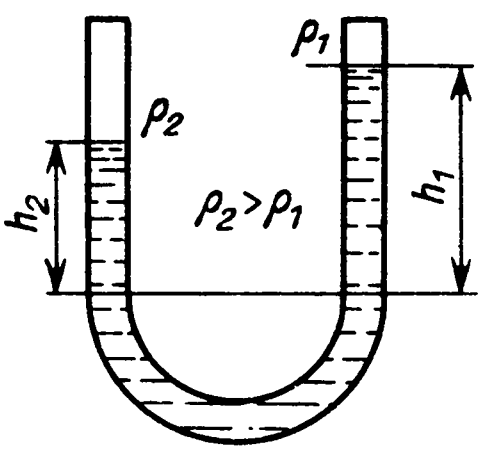


Рис. 1.41

Без учета поверхностного натяжения (см. гл. II) высоты уровней *h* жидкостей, находящихся в поле тяготения, обратно пропорциональны плотностям жидкостей:

$$h_1/h_2 = \rho_2/\rho_1 \qquad (1.102)$$

(индексы *1* относятся к одной жидкости, индексы *2* — к другой). Если $\rho_1 = \rho_2$, то уровни размещаются на одной высоте.

Течение идеальной жидкости

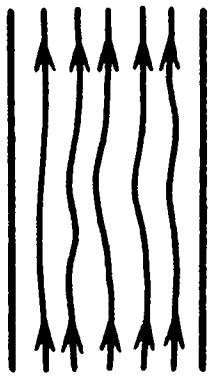


Рис. 1.42

Идеальной называется такая жидкость, в которой отсутствуют силы трения. Течение жидкости называется *ламинарным*, если скорость и давление в каждой точке не зависит от времени. Графически течение изображается *линиями тока* (рис. 1.42); это такие линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора скорости.

Поверхность, которая образуется линиями тока, проходящими через контур в жидкости (например, окружность), называется *трубкой тока.*

Уравнение Бернулли

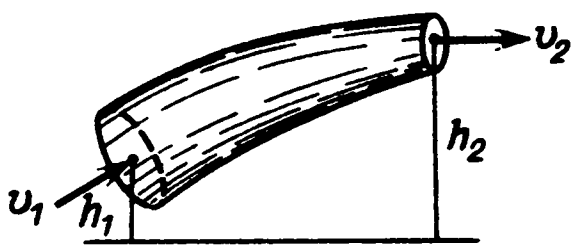


Рис. 1.43

В одной и той же трубке тока для любого ее сечения выполняется условие (рис. 1.43)

$$p+\rho gh+\rho v^2/2=\text{const}, \qquad (1.103)$$

p — давление, v — скорость, h — высота, на которой расположено данное сечение.

Формула Торичелли

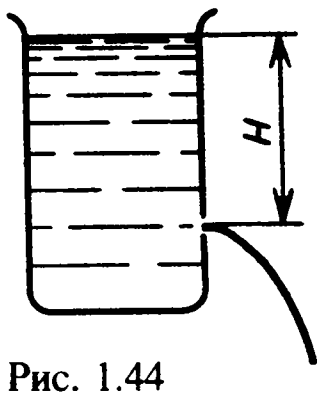


Рис. 1.44

Скорость v, с которой вытекает жидкость из малого отверстия в сосуде, определяется по формуле (рис. 1.44)

$$v^2=2gH, \qquad (1.104)$$

H — расстояние от верхнего уровня жидкости до отверстия.

Течение вязкой жидкости

При ламинарном течении реальной жидкости (или газа), когда слои смещаются относительно друг друга, возникают силы внутреннего трения, тормозящие движение слоев, движущихся с большой скоростью, и ускоряющие слои с меньшей скоростью.

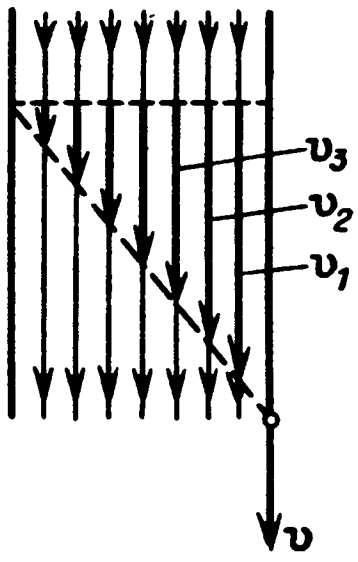


Рис. 1.45

Сила внутреннего трения (закон Ньютона):

$$F_{вт} = -\eta S \Delta v / \Delta l, \qquad (1.105)$$

Δv — разность скоростей движущихся слоев, Δl — расстояние между этими слоями по направлению, перпендикулярному скорости; η — динамическая вязкость — сила внутреннего трения, действующая между двумя слоями площадью 1 м^2, которые находятся друг от друга на расстоянии 1 м по нормали к вектору скорости, при разности скоростей между этими слоями 1 м/с.

Векторная величина, модуль которой равен

$$\lim_{\Delta l \to 0} (\Delta v / \Delta l) = dv/dt,$$

называется градиентом скорости.

Единица вязкости: паскаль-секунда, Па · с.

Движение твердого тела в вязкой жидкости

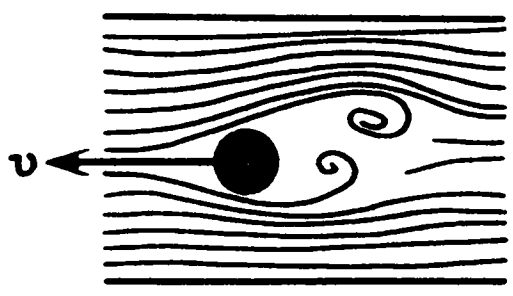


Рис. 1.46

При движении в жидкости твердого тела (например, шара, пластины) ближайший слой жидкости прилипает к нему и движется вместе с ним; остальные слои скользят друг относительно друга.

Действующая на движущееся в жидкости твердое тело сила направлена в сторону, противоположную движению тела; она называется *гидродинамической силой* (или *лобовым сопротивлением*). Лобовое сопротивление имеет две составляющие — силу трения и силу давления. Сила трения обусловлена вязкостью жидкости, сила давления — разностью давлений на передних и задних поверхностях движущегося тела.

Сила трения пропорциональна скорости, сила давления пропорциональна квадрату скорости.

Гидродинамическая сила

Гидродинамическую силу можно рассчитать по формуле:

$$F_{гд} = C_x \rho v^2 S/2, \qquad (1.106)$$

C_x — безразмерная величина, которая называется *коэффициентом гидродинамического сопротивления*; ρ — плотность жидкости, S — площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную вектору скорости $\mathbf{v}$.

Значения C_x приводятся в таблице (см. ниже п. 21).

Формула Стокса

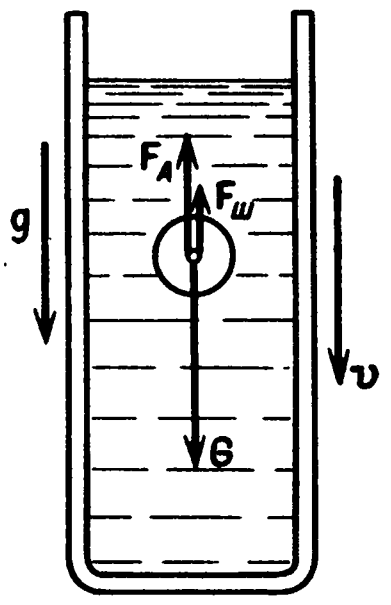


Рис. 1.47

При движении шара в вязкой жидкости сила трения, действующая на него, рассчитывается по формуле

$$\mathbf{F}_ш = -6\pi\eta R\mathbf{v}, \qquad (1.107)$$

η — динамическая вязкость жидкости, R — радиус шара, $\mathbf{v}$ — его скорость.

При падении шара в вязкой жидкости, находящейся в поле тяготения Земли, устанавливается движение с постоянной скоростью v_y при условии $\mathbf{F}_A + \mathbf{F}_ш = -\mathbf{G}$ (рис. 1.47, $\mathbf{F}_A$ — сила Архимеда, $\mathbf{G}$ — сила тяжести).

Скорость v_y рассчитывается по формуле

$$v_y = 2g(\rho - \rho_ж) R^2/(9\eta), \qquad (1.108)$$

g — ускорение свободного падения, ρ — плотность материала, из которого изготовлен шар, $\rho_ж$ — плотность жидкости, R — радиус шара.

Формула Пуазейля

При ламинарном течении объем вязкой жидкости (или газа), выте-

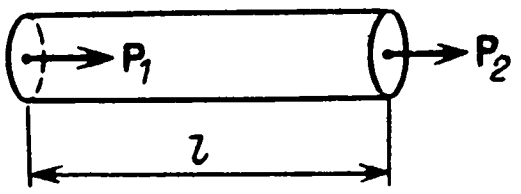


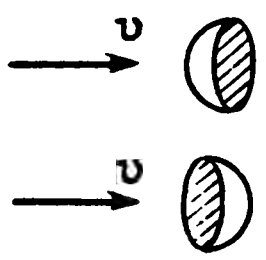
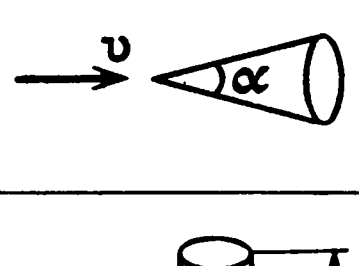
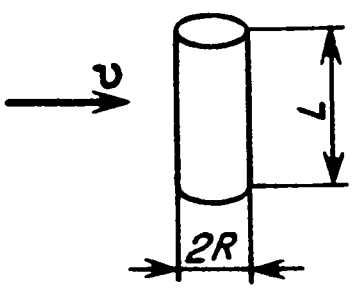
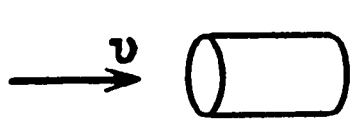
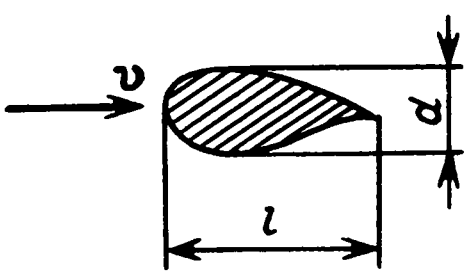
Рис. 1.48

кающей из трубы с круглым сечением за время 1 с, рассчитывается по следующей формуле:

$$V=\pi R^4(p_1-p_2)/(8l\eta), \qquad (1.109)$$

(p_1-p_2) — разность давлений на концах трубы длиною l (рис. 1.48).

21. Коэффициенты гидродинамического сопротивления

	Полусфера	0,34 1,33
	Конус $\alpha=30°$ $\alpha=60°$	0,34 0,51
	Круглый цилиндр $l/R=$ 2 4 10 20 80 ∞	0,63 0,68 0,74 0,82 0,98 1.20
	Круглый цилиндр $L/R=$ 0 2 4 8 14	1,11 0,91 0,85 0,87 0,99
	Специальный профиль $l/d=$ 2 3 5 10 20	0,2 0,1 0,06 0,08 0,09

22. Механические колебания и волны

Колебания

Ограниченные перемещения материальной точки или тела (или изменения состояний), повторяю-

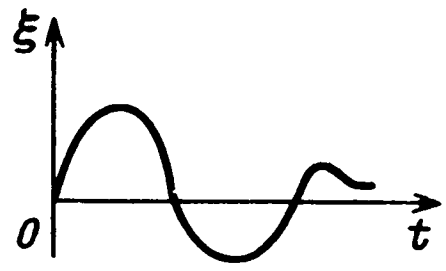


Рис. 1.49

щиеся полностью или частично в окрестности некоторого значения изменяющейся величины, называются *колебаниями* (рис. 1.49). Колебания называются *механическими*, если они характеризуются изменением только механических величин (смещения, скорости, ускорения, давления и т. п.).

Периодические колебания

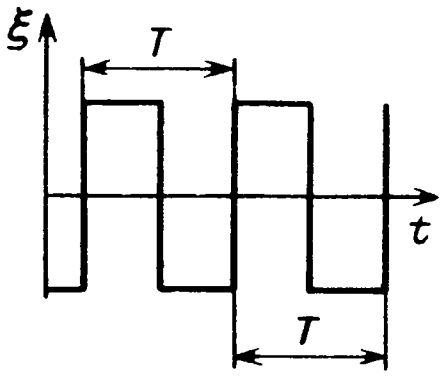


Рис. 1.50

Колебания, в которых каждое значение изменяющейся величины повторяется неограниченное число раз через одинаковые промежутки времени.

Наименьший промежуток времени, по истечении которого повторяется каждое значение изменяющейся величины, называется *периодом колебания* T (рис. 1.50).

Число колебаний за время одна секунда называется *частотой периодических колебаний* f

$$T=1/f. \qquad (1.110)$$

Гармонические колебания

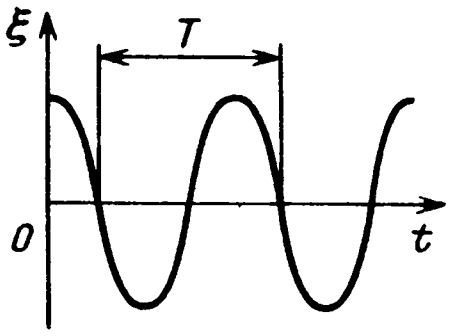


Рис. 1.51

Периодические изменения любой величины, которые могут быть выражены гармонической функцией (синуса или косинуса) (рис. 1.51),

$$\xi=A_0\cos(\omega t+\varphi), \qquad (1.111)$$

A_0 — амплитуда колебаний — величина, равная наибольшему (по модулю) значению изменяющейся величины; $(\omega t+\varphi)$ — фаза гармонического колебания, φ — начальная фаза, ω — угловая частота;

$$\omega=2\pi/T=2\pi f. \qquad (1.112)$$

Математический маятник

Подвешенное на тонкой нити тело малых размеров, совершающее колебания под действием силы тяжести (при отсутствии трения о воздух и в точке подвеса).

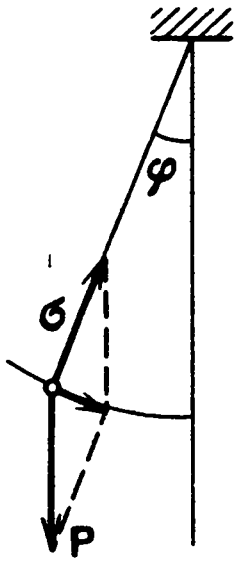


Рис. 1.52

Колебания математического маятника при малых углах отклонения (меньше 5 градусов) можно считать гармоническими (рис. 1.52). Период колебания математического маятника

$$T=2\pi\sqrt{l/g}, \qquad (1.113)$$

l — длина маятника, g — ускорение свободного падения.

Колебания в вертикальном направлении тела, подвешенного на пружине, можно считать гармоническими, если при ее деформации (сжатии и растяжении) выполняется закон Гука (см. п. 5 гл. I), силы трения малы, а массой пружины M можно пренебречь по сравнению с массой m тела, совершающего колебания ($M \ll m$); при этих условиях период колебаний тела, подвешенного на пружине (рис. 1.53), рассчитывается по формуле

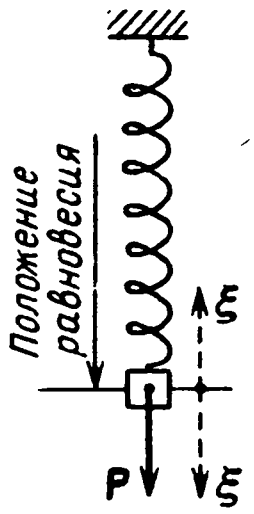


Рис. 1.53

$$T=2\pi\sqrt{m/k}, \qquad (1.114)$$

k — жесткость пружины — величина, равная отношению внешней силы F к изменениям длины пружины Δl,

$$k=F/\Delta l. \qquad (1.115)$$

Квазиупругие силы

По этой же формуле можно рассчитать период гармонических колебаний, которые возбуждаются не только упругими силами, но и другими силами, которые пропорциональны смещению тела от положения равновесия (квазиупругие силы):

$$F_к=-k_у u, \qquad (1.116)$$

$k_у$ — коэффициент квазиупругой силы, u — смещение.

Крутильный маятник

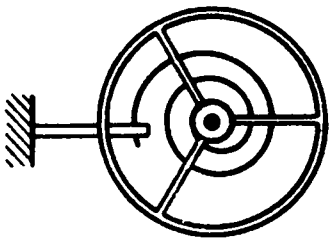


Рис. 1.54

Тело, совершающее вращательно-колебательное движение под действием пружины (например, балансир в механических часах) (рис. 1.54). Когда амплитуда смещения и силы трения достаточно малы, эти колебания можно считать гармоническими; период колебаний крутильного маятника

$$T=2\pi\sqrt{I/D}, \qquad (1.117)$$

I — момент инерции тела относительно оси вращения, D — крутильная жесткость — скалярная величина, равная модулю момента сил, который необходим для поворота тела на угол 1 радиан.

Физический маятник

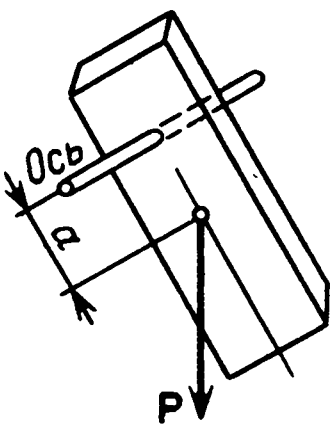


Рис. 1.55

Тело, совершающее колебания вокруг горизонтальной оси под действием силы тяжести (рис. 1.55). Период колебаний физического маятника

$$T=2\pi\sqrt{I/(mga)}, \qquad (1.118)$$

I — момент инерции тела относительно оси, проходящей через точку подвеса, a — расстояние от центра тяжести до этой оси, m — масса тела, g — ускорение свободного падения. Величина

$$l_{\text{п}}=I/(ma) \qquad (1.119)$$

называется *приведенной длиной* физического маятника.

Затухающие колебания

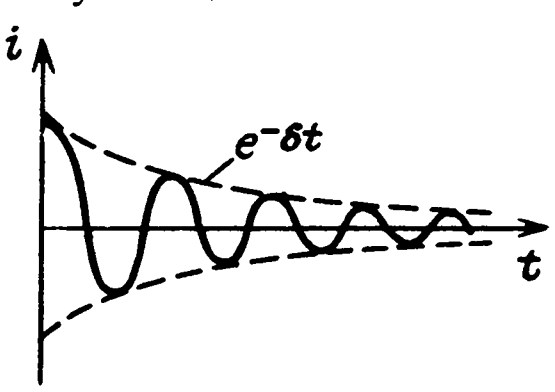


Рис. 1.56

Колебания, амплитуда которых уменьшается со временем, называются затухающими (рис. 1.56). Уравнение затухающих колебаний

$$u=u_0e^{-\delta t}\cos(\omega t+\varphi), \qquad (1.120)$$

u — смещение тела от положения равновесия; положительная величина u_0 называется начальной ампли-

тудой, δ — *коэффициент затухания*; $u_0 e^{-\delta t}$ — амплитуда смещения в момент времени t, ω — угловая частота, e — основание натуральных логарифмов;

$$\delta = r/(2m), \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2},$$

r — коэффициент сопротивления, равный отношению силы трения к скорости колебаний частиц, m — масса тела, k_y — коэффициент квазиупругой силы, $\omega_0^2 = k_y/m$.

Вынужденные колебания

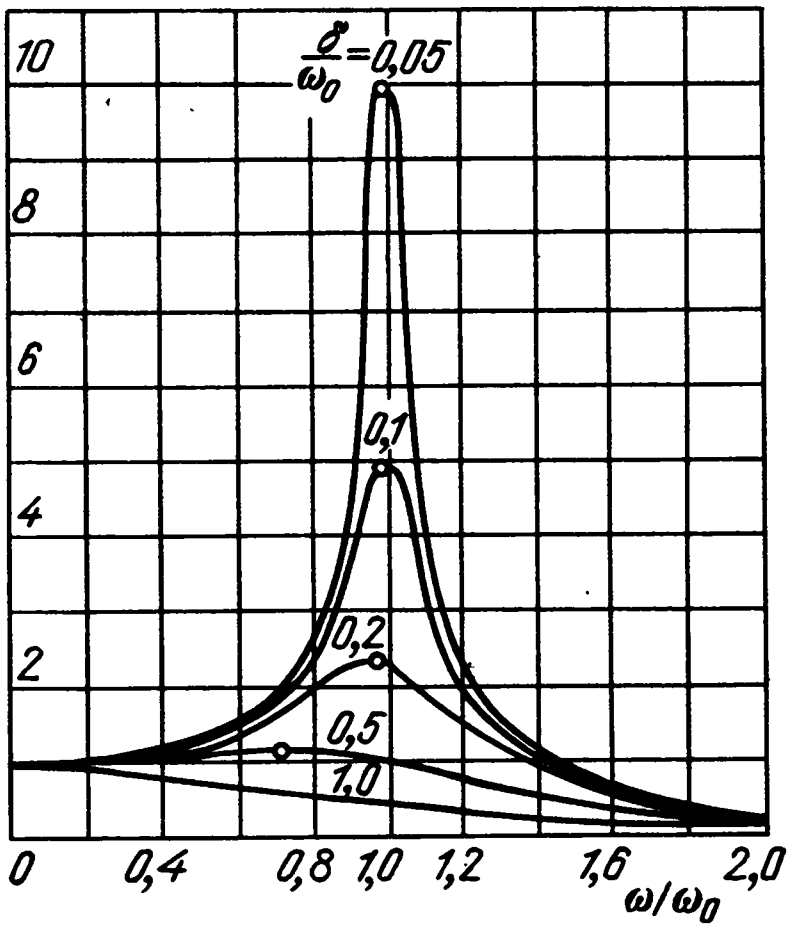


Рис. 1.57

Колебания, которые совершает тело под действием периодической внешней силы. Амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает, если период гармонической внешней силы приближается к периоду свободных колебаний тела. Это явление называется *резонансом*. Если силы трения велики (большое затухание), то резонанс выражен слабо или совсем не проявляется (например, при $\delta/\omega_0 \geqslant 1$, рис. 1.57, по вертикальной оси отложена относительная амплитуда).

Сложение гармонических колебаний

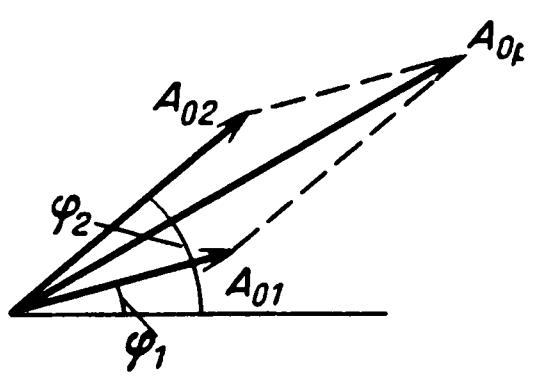


Рис. 1.58

Амплитуда результирующего смещения A при сложении двух колебаний, имеющих одинаковое направление и частоту, находится по фазовой диаграмме (рис. 1.58):

$$A_{0p}^2 = A_{01}^2 + A_{02}^2 + \\ + 2A_{01}A_{02}\cos(\varphi_2 - \varphi_1), \qquad (1.121)$$

A_{01} и A_{02} — амплитуды колебаний, $\varphi_2 - \varphi_1$ — разность фаз. Любое негармоническое колебание можно пред-

ставить как результат сложения гармонических колебаний с различными частотами, амплитудами и начальными фазами. Такие гармонические колебания называются *гармониками.* При сложении гармонических колебаний, имеющих одинаковые направления, но различные (кратные) частоты, образуются негармонические колебания, которые зависят от амплитуд и начальных фаз гармоник, а также от их количества.

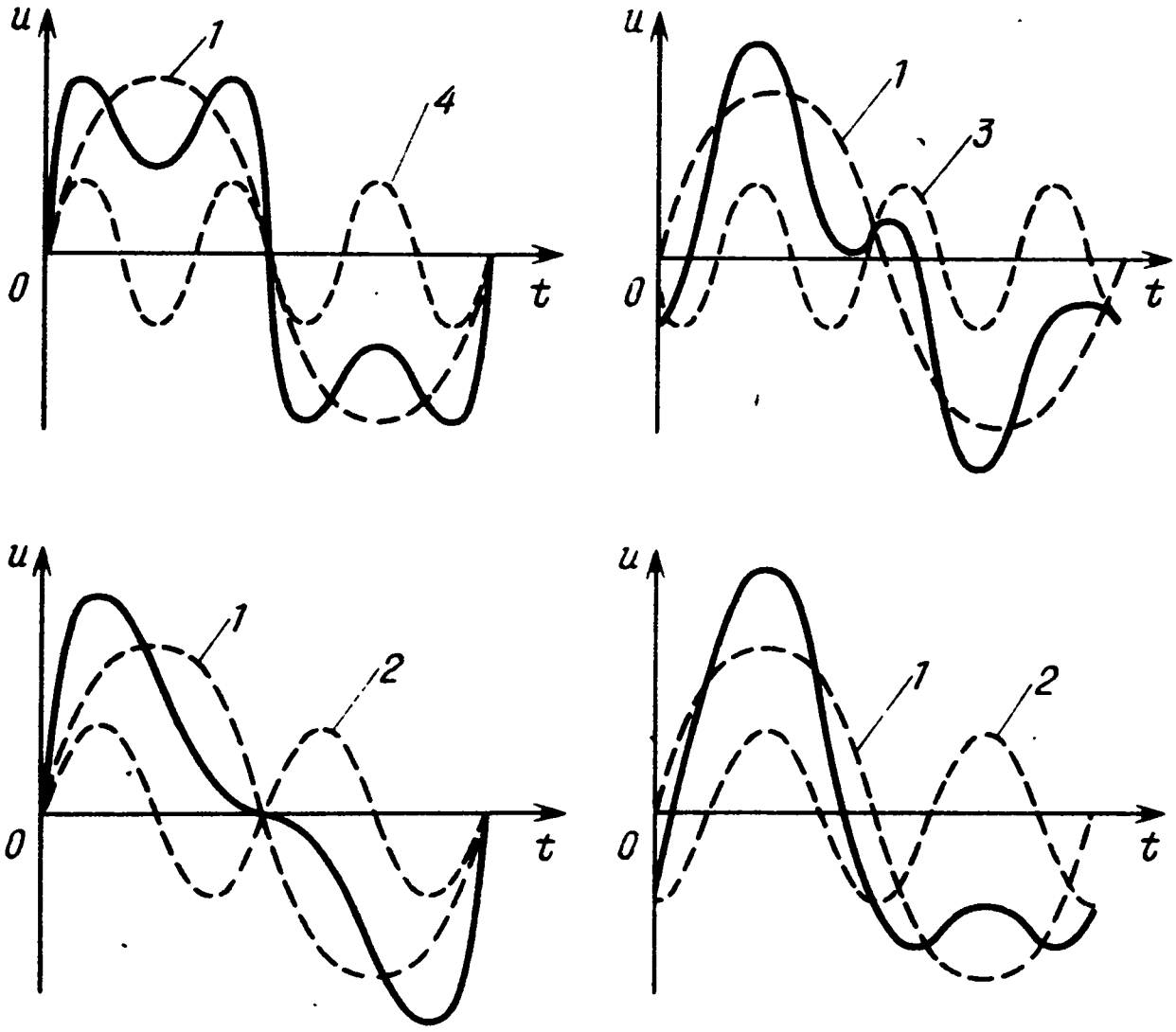


Рис. 1.59

На рис. 1.59 показаны результаты сложения первой (основной), второй, третьей, четвертой гармоник; цифры указывают номера гармоник; сплошной линией изображены результирующие колебания.

Фигуры Лиссажу

При сложении двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний траекториями результирующих движений являются кривые.

которые называются *фигурами Лиссажу*. При равенстве частот ω_1 и ω_2 фигуры Лиссажу — эллипсы, которые при разностях начальных фаз $\varphi = m\pi$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$) вырождаются в отрезки прямых. Если отношение частот равно рациональному числу, то фигуры Лиссажу не изменяются; форма их зависит от отношения частот и разности начальных фаз (см. рис. 1.60).

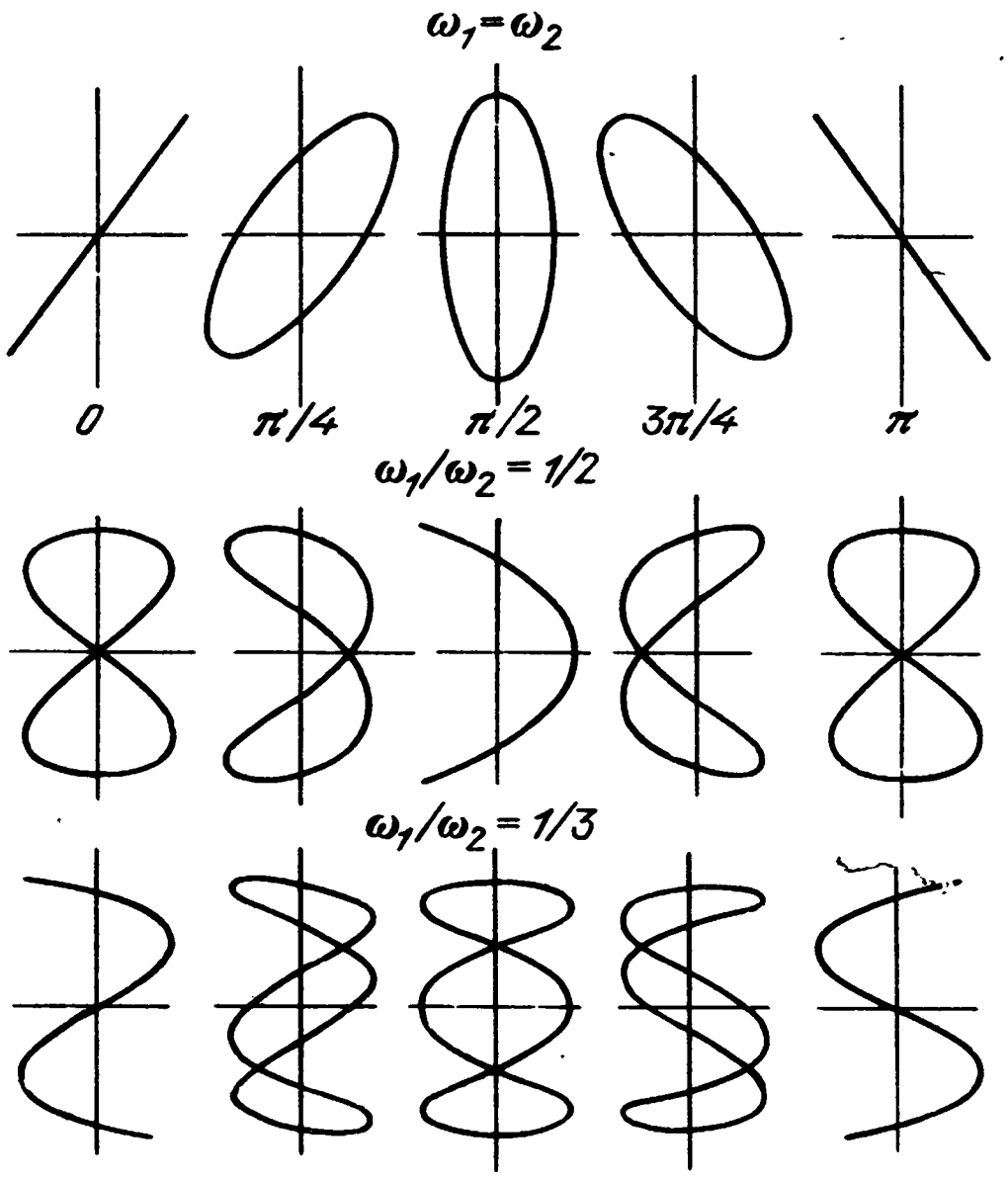


Рис. 1.60

Волны

Распространяющиеся в пространстве изменения любой физической величины.
Скорость волны — скорость распространения возмущения в среде.

Скорость колебания частиц

Скорость колебательного движения частиц около положения равновесия при распространении

механических волн. Если при распространении волн величины, характеризующие состояние среды (например, плотность, смещение частиц, давление и т. п.), изменяются в любой точке пространства по гармоническому закону, то такие волны называются *гармоническими.*

Длина волны

Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное одному периоду:

$$\lambda = vT = v/f, \qquad (1.122)$$

v — скорость волн, f — частота.

Уравнение плоской волны

Математическое выражение вида

$$\xi = A\cos\left(\omega\left(t - r/v\right)\right) = A\cos\left(\omega t - kr\right), \qquad (1.123)$$

которое описывает изменение состояния среды при распространении гармонических волн; ξ — любой параметр, характеризующий состояние среды, например, давление, температура и т. д.; A — амплитуда; ω — угловая частота; r — расстояние от источника, возбуждающего волну, до точки пространства, в которой рассматривается изменение соответствующей величины, v — скорость волны; $k = 2\pi/\lambda$ — *волновое число*; $(\omega t - kr)$ — *фаза волны.*

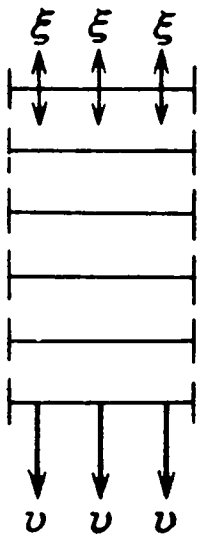


Рис. 1.61

Волновая поверхность

Поверхность, проведенная через точки, в которых совершаются колебания в одинаковых фазах.

По форме волновых поверхностей различают плоские (волновая поверхность — плоскость), цилиндрические (цилиндрические волновые поверхности) и сферические (сферические волновые поверхности) волны. Уравнения цилиндрических и сферических волн:

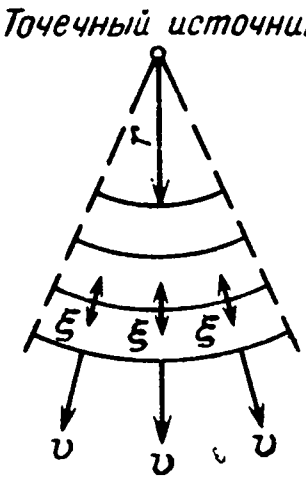


Рис. 1.62

$$\xi_{ц} = A/\sqrt{r}\cos(\omega t - kr), \qquad (1.124)$$

$$\xi_{с} = A/r\cos(\omega t - kr), \qquad (1.125)$$

A — амплитуда на расстоянии 1 м от источника.

Продольные и поперечные волны

Если смещение частиц среды u происходит параллельно направлению распространения волны, то такая волна называется *продольной*; если смещение частиц u происходит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения, то такая волна называется *поперечной*. Механические волны в жидких и газообразных средах являются продольными; в твердых телах возможны и продольные, и поперечные волны.

Волны на поверхности жидкости не являются ни поперечными, ни продольными. Движение частиц воды при распространении поверхностных волн зависит от отношения λ/h (λ — длина волны, h — глубина, рис. 1.63).

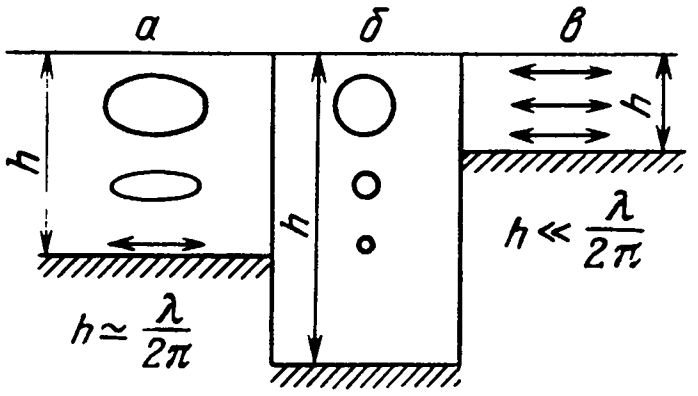


Рис. 1.63

Амплитуда скорости колебаний частиц

$$u_0 = \omega u_0, \qquad (1.126)$$

амплитуда ускорения

$$a_0 = \omega^2 u_0, \qquad (1.127)$$

u_0 — амплитуда смещения, ω — угловая частота. Графики смещения, скорости колебаний частиц и ускорения приводятся на рис. 1.64.

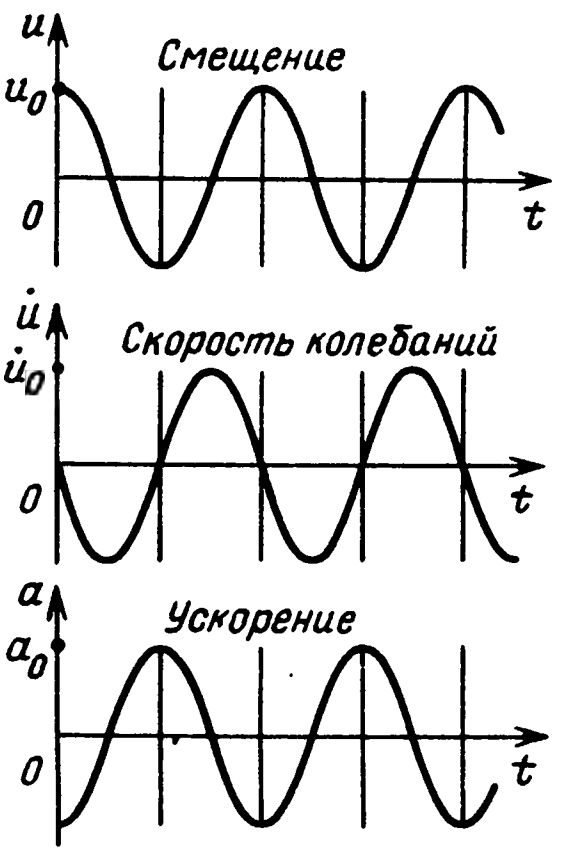


Рис. 1.64

Звук, инфразвук, ультразвук

Звук — механические волны, частоты которых лежат в пределах от 17—20 до 20000 Гц. Механические волны таких частот производят ощущение звука в человеческом ухе. Механические волны с частотами ниже 17 Гц называются *инфразвуками*, а свыше 20000 Гц — *ультразвуками*.

Поток звуковой энергии

Энергия, которая переносится звуковыми волнами через волновую поверхность за время 1 с.

При восприятии звука ухом различают громкость, высоту тона и тембр. *Громкость звука* определяется амплитудой смещений, *высота тона* — частотой, *тембр* — частотами и амплитудами обертонов (колебаний с более высокими частотами).

Интенсивность

Средняя энергия, переносимая волной за время 1 с через волновую поверхность площадью 1 м^2. Интенсивность I звуковых волн иногда называют *силой звука*. Интенсивность гармонических звуковых волн рассчитывается по формуле

$$I = \rho v u_0^2/2, \qquad (1.128)$$

ρ — плотность среды, v — скорость распространения звуковых волн, u_0 — амплитуда скорости колебаний частиц.

Интенсивности звука при слуховом восприятии соответствует ощущение громкости звука. При определенной минимальной интенсивности человеческое ухо не воспринимает звука. Эта минимальная интенсивность называется *порогом слышимости*. Порог слышимости

имеет различные значения для звука различных частот. При больших интенсивностях ухо испытывает болевое ощущение. Наименьшая интенсивность при болевом восприятии звука называется *порогом болевого ощущения*.

Звуковое давление

Изменение давления в среде при распространении звуковых волн по сравнению с давлением при отсутствии волн. Амплитуда звукового давления

$$\Delta p_0 = \rho v u_0, \qquad (1.129)$$

u_0 — амплитуда скорости колебаний частиц, v — скорость волн, ρ — плотность.

Поглощение звука

Отношение поглощенного средой потока звуковой энергии к потоку энергии, входящему в эту среду, называется *коэффициентом поглощения*. Амплитуда звукового давления плоских звуковых волн уменьшается вследствие поглощения энергии средой по закону

$$\Delta p_z = \Delta p_0 e^{-\alpha z}, \qquad (1.130)$$

Δp_0 — начальная амплитуда, Δp_z — амплитуда после прохождения волной расстояния z, α — показатель поглощения — величина, равная $1/z_e$, где z_e — расстояние, на котором амплитуда давления уменьшается в e раз.

Отражение звука

Отношение отраженного потока звуковой энергии к падающему потоку звуковой энергии называется *коэффициентом отражения*; отношение проходящего потока звуковой энергии к падающему потоку звуковой энергии называется *коэффициентом пропускания*.

Стоячие волны

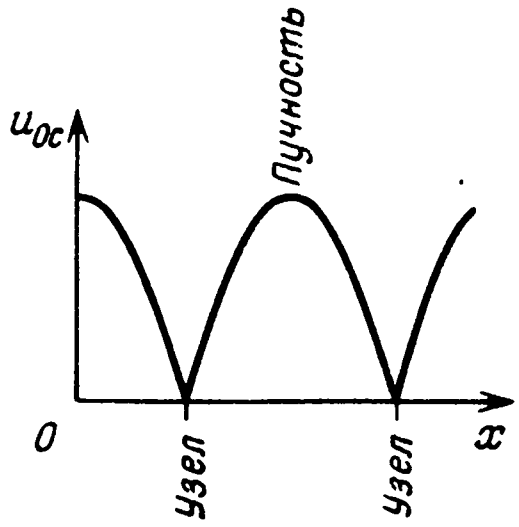


Рис. 1.65

Образуются при сложении двух монохроматических волн, распространяющихся в противоположных направлениях.

Уравнение стоячей волны смещений (при равенстве амплитуд и начальных фаз взаимодействующих волн):

$$u = 2A\cos(kz)\cos(\omega t); \qquad (1.131)$$

амплитуда стоячей волны

$$u_{0c} = 2A\,|\cos(kz)|. \qquad (1.132)$$

Точки, в которых амплитуды смещения имеют максимальные значения, называются *пучностями смещения*; пучности расположены на плоскостях, координаты которых удовлетворяют условиям

$$z = m\lambda/2 \quad (m = 0, 1, 2, \ldots).$$

Точки, где амплитуды смещений равны нулю, называются *узлами смещения*; узлы расположены на плоскостях, определяемых условием

$$z = (m + 1/2)\frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \ldots).$$

23. Формулы расчета скорости волн в изотропных средах

Виды волн	Формулы	
Продольные волны в стержнях	$v_0^2 = E/\rho$	(1.133)
Волны объемного сжатия в твердом теле	$v_1^2 = E(1-\nu)/(\rho(1+\nu)(1-2\nu))$	(1.134)
Поперечные волны (волны сдвига)	$v_2^2 = G/\rho$	(1.135)
Продольные волны в тонких пластинках	$v_{пл}^2 = E/(\rho(1-\nu^2))$	(1.136)
Волны в жидкостях	$v_ж^2 = 1/(\rho\beta_{ад})$	(1.137)

Продолжение

Виды волн	Формулы	
Волны в газовых средах	$v_{г}^2=\gamma p/\rho$	(1.138)
Волны в идеальных газах	$v_{иг}^2=\gamma RT/\mu$	(1.139)
Поверхностные волны в жидкостях (на границе газ — жидкость)	$v_{п}^2=g\lambda/(2\pi)+2\pi\alpha/(\lambda\rho)$	(1.140)
Поверхностные волны в слое малой глубины $(h<0{,}5\lambda)$	$v_{м}^2=gh$	(1.141)

Примечания. 1. E — модуль Юнга, G — модуль сдвига, ν — коэффициент Пуассона, $\beta_{ал}$ — адиабатическая сжимаемость (см. гл. II), ρ — плотность, γ — отношение удельных теплоемкостей c_p/c_V, p — давление, α — коэффициент поверхностного натяжения, R — молярная газовая постоянная, μ — молярная масса, T — температура, λ — длина волны, g — ускорение свободного падения, h — глубина слоя жидкости.

2. В кристаллах скорость волн зависит от направления распространения. Для расчета скоростей в кристаллах используется набор (матрица) независимых модулей, количество которых зависит от типа кристаллической решетки.

Глава II

Термодинамика и молекулярная физика

В термодинамике изучаются закономерности превращения энергии; в молекулярной физике используются представления о молекулярном строении вещества, рассматриваются различные модели.

1. Температура, теплота, теплоемкость

Термодинамическая система — Совокупность тел, которые могут обмениваться между собой, а также с телами вне системы энергией и веществом.

Термодинамические параметры — Величины, характеризующие состояние системы (объем, давление, температура и др.).

Термодинамическое равновесие — Изолированная система приходит с течением времени в равновесие, т. е. все ее параметры во всех частях становятся одинаковыми (рис. 2.1); самопроизвольно выйти из равновесия система не может.

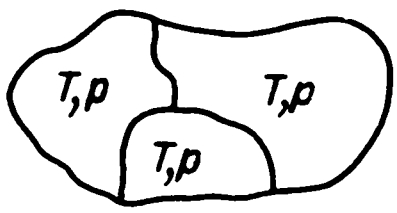


Рис. 2.1

Температура — Скалярная величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия и определяющая направление теплообмена между телами. В отношении системы, которая не находится в равновесии, понятие температуры не имеет смысла.

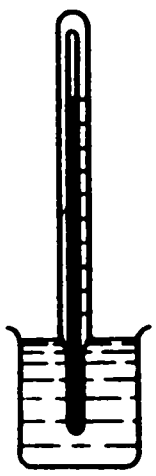


Рис. 2.2

Единица температуры — кельвин, К — Является в СИ одной из семи основных единиц (см. «Основные единицы»).

Установлена Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68) (см. ниже).

Теплота

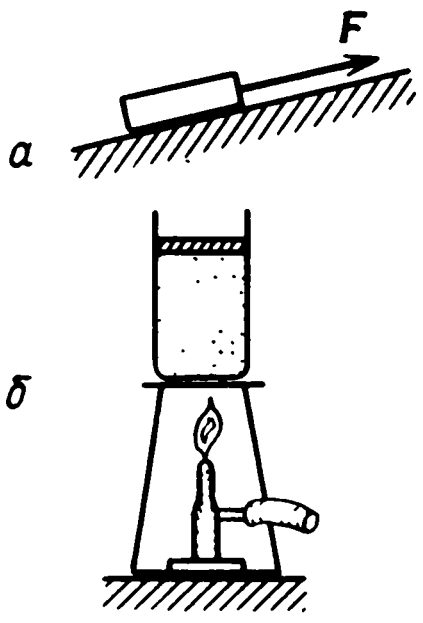


Рис. 2.3

Передача энергии от одного тела к другому может быть осуществлена двумя способами: первый способ — посредством работы механических или электромагнитных сил; второй способ — посредством теплообмена, когда энергия передается тепловым движением молекул за счет теплопроводности или тепловым излучением (см. гл. IV). Энергия, передаваемая при теплообмене, называется *количеством теплоты* (или просто *теплотой*).

Теплоемкость

Теплота, необходимая для изменения температуры тела на один кельвин. Теплоемкость данного тела зависит от температуры и процесса нагревания (охлаждения).

Средняя теплоемкость

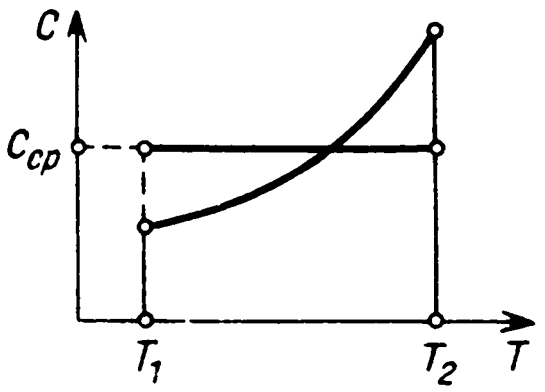


Рис. 2.4

Отношение теплоты Q, необходимой для изменения температуры тела от T_1 до T_2, к разности температур $T_2 - T_1$ называется средней теплоемкостью в интервале температур от T_1 до T_2:

$$c_{ср} = \frac{Q}{T_2 - T_1}. \qquad (2.1)$$

Средняя удельная теплоемкость

Средняя теплоемкость тела единичной массы

$$c_{су} = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)}. \qquad (2.2)$$

Удельная теплоемкость (истинная)

$$c = \lim_{\Delta T \to 0} (\Delta Q / \Delta T)/m, \qquad (2.3)$$

ΔQ — теплота, необходимая для изменения температуры на ΔT тела массой m.

Молярная теплоемкость	Теплоемкость тела, которое содержит количество вещества 1 моль, $C = c\mu$, (2.4) μ — молярная масса, равная массе такого тела, которое содержит 1 моль вещества (см. «Основные единицы»).
Удельные теплоемкости c_p и c_V	Теплоемкость при изобарическом процессе (нагревание происходит при постоянном давлении) называется теплоемкостью при постоянном давлении c_p; теплоемкость при изохорическом процессе называется теплоемкостью при постоянном объеме c_V; всегда $c_p > c_V$; для твердых веществ c_p и c_V незначительно отличаются друг от друга.
Теплота, необходимая для нагревания тела	$\Delta Q = cm\Delta T$, (2.5) c — удельная теплоемкость, m — масса тела, ΔT — изменение температуры.

2. Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68)

Равновесие двух фаз, когда это не оговорено особо, предполагается при нормальном атмосферном давлении (1 атм = 101325 Па)

Состояние равновесия	Присвоенные значения температуры	
	К	С
Тройная точка равновесного водорода	13,81	−259,34
Равновесия между жидкой и газообразной фазами водорода при давлении 3333,06 Па	17,042	−256,108
Равновесие между жидкой и газообразной фазами водорода	20,28	−252,87
Равновесие между жидкой и газообразной фазами неона	27,102	−246,048
Тройная точка кислорода	54,361	−218,789
Равновесие между жидкой и газообразной фазами кислорода	90,188	−182,962
Тройная точка воды	273,16	0,01

Продолжение

Состояние равновесия	Присвоенные значения температуры	
	К	С
Равновесие между жидкой и парообразной фазами воды	373,15	100
Равновесие между твердой и жидкой фазами цинка	692,73	419,58
Равновесие между твердой и жидкой фазами серебра	1235,08	961,93
Равновесие между твердой и жидкой фазами золота	1337,58	1064,43

Примечание. Положение о МПТШ-68 принято Международным комитетом мер и весов в 1968 г.

3. Законы термодинамики

Внутренняя энергия

Сумма кинетической энергии хаотического движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия; во внутреннюю энергию не входит кинетическая энергия тела и потенциальная энергия тела во внешнем поле (например, в поле тяготения); она зависит только от параметров состояния.

Первый закон термодинамики

Сумма теплоты ΔQ, которую получает система при нагревании, и работы ΔA, которая совершается над системой внешними силами, равна изменению внутренней энергии δU

$$\Delta Q + \Delta A = \delta U. \qquad (2.6)$$

Изменение внутренней энергии δU не зависит от процесса и определяется параметрами начального и конечного состояний; напротив, ΔQ и ΔA зависят от процессов перехода из начального в конечное состояние.

При расчетах по формуле (2.6) теплота, подводимая к системе, считается положительной $(\Delta Q > 0)$; если

система отдает теплоту во внешнюю среду, то она считается отрицательной $(\Delta Q<0)$. Работа внешних сил считается положительной $(\Delta A>0)$, работа, совершаемая самой системой, считается отрицательной $(\Delta A<0)$.

Работа

Системой совершается работа при изменении ее объема.
Элементарная работа

$$\Delta A = p\Delta V, \qquad (2.7)$$

p — давление, ΔV — элементарное (малое) изменение объема.
Работа системы при переходе из одного состояния в другое:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p\,dV, \qquad (2.8)$$

V_1 и V_2 — объемы системы в начальном и конечном состояниях.

Второй закон термодинамики

Взаимные превращения теплоты и работы неравноценны; работа может полностью превратиться в теплоту, а теплоту невозможно полностью превратить в работу.
Машина, которая бы полностью превращала теплоту в работу, называется вечным двигателем второго рода.
Вечный двигатель второго рода запрещается вторым законом термодинамики, хотя он и не противоречит первому закону термодинамики.

Формулировки второго закона

«В природе невозможен процесс, единственным результатом которого была бы механическая работа, полученная за счет охлаждения теплового резервуара» (У. Томсон).
«Теплота не переходит самопроизвольно от холодного тела к горячему» (Р. Клаузиус).

Энтропия S

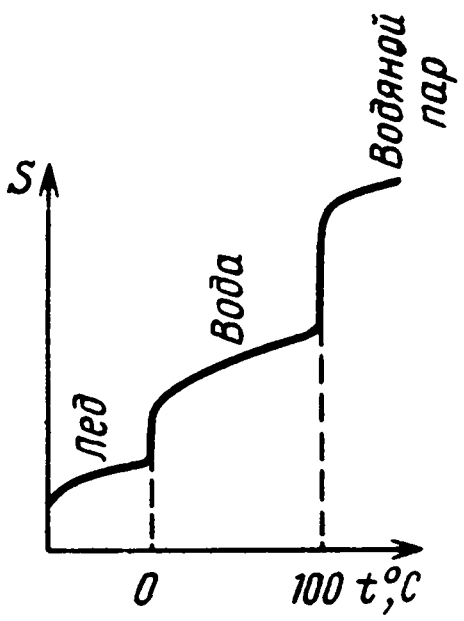


Рис. 2.5

Направление самопроизвольных процессов устанавливается функцией, которая получила название *энтропии.*

Энтропия — мера беспорядка в системе: полная упорядоченность частиц в системе (например, в кристаллах) соответствует минимуму энтропии, полный беспорядок — максимуму. Например, энтропия водяного пара больше, чем энтропия воды; в свою очередь, энтропия воды больше, чем энтропия льда (см. рис. 2.5). В замкнутых системах самопроизвольные процессы увеличивают энтропию; в состоянии теплового равновесия система имеет максимальную энтропию.

Неравенство Клаузиуса

В замкнутых системах изменение энтропии

$$\delta S \geqslant 0.$$

Коэффициент полезного действия тепловых машин

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \tag{2.9}$$

Q_1 — теплота, полученная рабочим телом (газом) от нагревателя, Q_2 — теплота, отданная холодильнику. Предельное (максимальное) значение коэффициента полезного действия

$$\eta_{\text{пр}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \tag{2.10}$$

T_1 — температура нагревателя машины, T_2 — температура холодильника,

$$\eta \leqslant \eta_{\text{пр}}.$$

Третий закон термодинамики

Энтропия простых кристаллических тел стремится к нулю при $T \to 0$, вследствие чего теплоемкость при $T \to 0$ также стремится к нулю.

4. Фазовые переходы

Переход вещества из одной фазы в другую называется *фазовым переходом*.

Фаза

Рис. 2.6

Часть системы, которая в отсутствие внешних воздействий имеет одинаковые физические свойства во всех своих точках и ограничена поверхностью раздела. Например, лед, вода, водяной пар, образующие систему, являются различными фазами (рис. 2.6); графит и алмаз — различные фазы твердого углерода. Система может состоять из одной фазы.

Теплота фазовых переходов

Поглощение или выделение определенного количества теплоты при фазовых переходах.

Парообразование и сжижение (конденсация)

Переход из пара в жидкость называется *парообразованием*, обратный переход — *сжижением* (конденсацией).

Испарение

Парообразование со свободной поверхности жидкости. При испарении жидкость охлаждается.

Кипение

Парообразование во всем объеме жидкости (при постоянной температуре кипения).

Сублимация

Переход из кристаллического состояния непосредственно в пар.

Насыщенный пар

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью в закрытом сосуде.

Критическое состояние

Состояние, характеризующееся тем, что плотности жидкости и ее насыщенного пара становятся одинаковыми, при этом граница раздела

между жидкостью и паром исчезает. Соответствующие этому состоянию плотность, давление и температура называются *критическими параметрами.*

Теплота фазовых переходов

Теплота плавления

$$Q_{\text{пл}} = \lambda m, \tag{2.11}$$

λ — *удельная теплота плавления* (теплота, необходимая для плавления кристалла или поликристалла массой 1 кг), m — масса расплавленного вещества.

Теплота парообразования

$$Q_{\text{пар}} = rm, \tag{2.12}$$

r — *удельная теплота парообразования* (теплота, необходимая для превращения в пар жидкости массой 1 кг).

Изменение размеров тел при нагревании

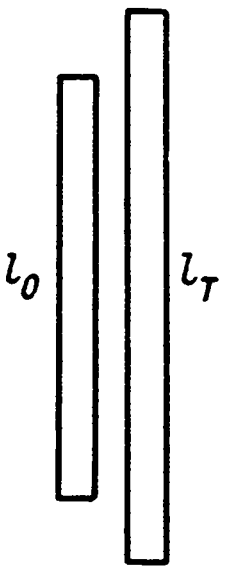


Рис. 2.7

Линейные размеры при температуре T рассчитываются по формуле

$$l_T = l_0 (1 + \alpha \Delta T), \tag{2.13}$$

l_0 — длина при температуре $T_0 = 273{,}15$ К, α — температурный коэффициент длины (относительное изменение длины при изменении температуры на 1 кельвин), $\Delta T = T - T_0$.

Объем при температуре T рассчитывается по формуле

$$V_T = V_0 (1 + \beta \Delta T), \tag{2.14}$$

V_0 — объем при температуре $T_0 = 273{,}15$ К, β — температурный коэффициент объема (относительное изменение объема при изменении температуры на 1 кельвин).

В изотропных телах

$$\beta \simeq 3\alpha. \tag{2.15}$$

5. Идеальные газы

Идеальный газ

Газ, свойства которого описываются уравнением

$$pV = mRT/\mu. \qquad (2.16)$$

Это уравнение называется *уравнением состояния идеального газа* или *уравнением Менделеева — Клапейрона*; p — давление, V — объем, m — масса, μ — молярная масса, R — молярная газовая постоянная, равная работе одного моля идеального газа при нагревании на 1 кельвин (при постоянном давлении). Уравнение применяется для расчета свойств газов, плотность которых меньше плотности их насыщенных паров при тех же температурах.

Температурный коэффициент объема и давления

$$\beta = 1/(273{,}15)\,\mathrm{K}^{-1}.$$

Разность молярных теплоемкостей

$$C_p - C_V = R. \qquad (2.17)$$

Закон Дальтона

В смеси химически не взаимодействующих газов давление равно сумме парциальных давлений:

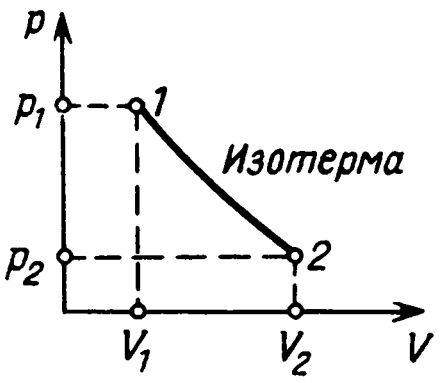
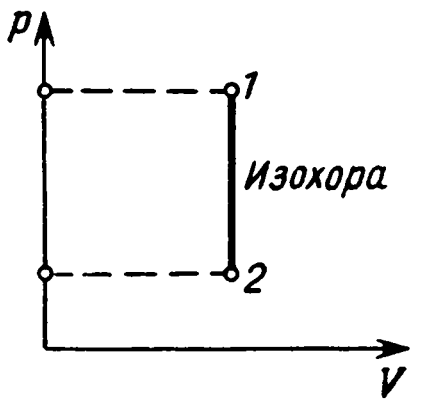
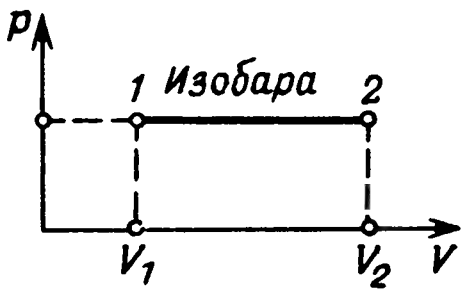
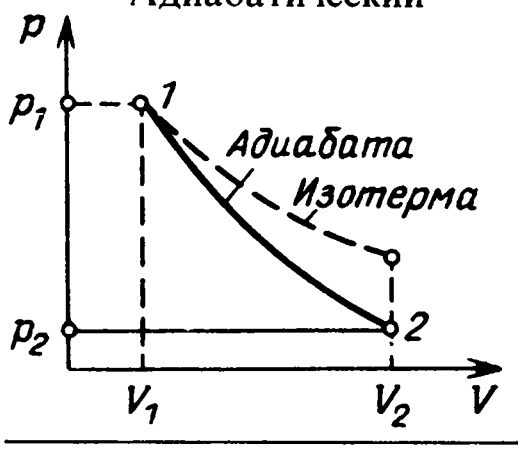
$$p = \sum_i p_i. \qquad (2.18)$$

Парциальное давление — давление одного газа, занимающего тот же объем, что и смесь газов (при той же температуре).

Гермодинамические процессы

Если при изменении состояния один из параметров (p, V или T) остается неизменным, то процессы соответственно называются *изобарическими* ($p = \mathrm{const}$), *изохорическими* ($V = \mathrm{const}$), *изотермическими* ($T = \mathrm{const}$). При адиабатическом процессе теплота к системе не подводится, т. е. $\Delta Q = 0$.

Основные характеристики процессов

Процесс	Уравнение состояния	Работа газа массой m	Изменение внутр. энергии 1 моля газа
Изобарический 	$V/T=\text{const}$ $m=\text{const}$ $p=\text{const}$ (закон Гей-Люссака)	$A_p=\dfrac{mR\Delta T}{\mu}$	$\delta U=C_V\Delta T$ (2.19)
Изохорический 	$p/T=\text{const}$ $m=\text{const}$ $V=\text{const}$ (закон Шарля)	$A_V=0$	$\delta U=\Delta Q$ (2.20)
Изотермический 	$pV=\text{const}$ $m=\text{const}$ $T=\text{const}$ (закон Бойля — Мариотта)	$A_T=A_0\ln(V_2/V_1)=$ $=A_0\ln(p_1/p_2);$ $A_0=mRT/\mu$	$\delta U=0$ (2.21)
Адиабатический 	$pV^\gamma=\text{const};$ $\Delta Q=0$ $\gamma=c_p/c_V$	$A_Q=\dfrac{mC_V}{\mu}(T_1-T_2)$	$\delta U=-A_Q$ (2.22)

Примечание. Индексы *1* и *2* у V, p и T указывают соответственно значения этих параметров в начальном и конечном состояниях; C_V — молярная теплоемкость при постоянном объеме; при изотермическом расширении газа теплота расходуется на работу против внешних сил, при сжатии теплота передается во внешнюю среду.

6. Реальные газы

Уравнение Ван-дер-Ваальса

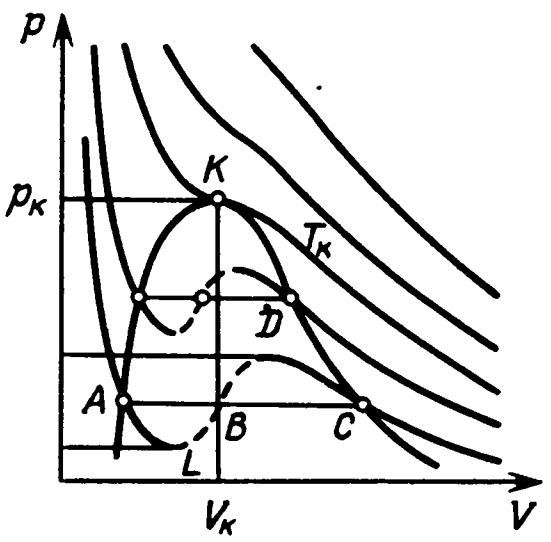


Рис. 2.8

Уравнение

$$\left(p+\nu^2\frac{a}{V^2}\right)(V-\nu b)=\nu RT \qquad (2.23)$$

называется уравнением Ван-дер-Ваальса; $\nu=m/\mu$, V — объем, m — масса газа, T — температура, μ — молярная масса, p — давление, a и b — постоянные Ван-дер-Ваальса.

Изотермы Ван-дер-Ваальса приведены на рис. 2.8. При температурах ниже $T_к$ изотермы имеют S-образный изгиб; при этих температурах одному значению давления p соответствует три значения объема. При температурах $T_к$ и выше нее изотермы не имеют S-образного изгиба. Температура $T_к$ является *критической температурой*, соответствующие этому состоянию давление $p_к$ и объем $V_к$ называются *критическими*. В действительности на участках S-образного изгиба изотермы проходят параллельно оси абсцисс (например, через точки A, B, C). Эти участки соответствуют равновесию между жидкостью и ее насыщенным паром. При некоторых условиях изотерма может проходить по участкам AL (перегретая жидкость) и DC (пересыщенный пар), но такие состояния являются неустойчивыми.

Влажный воздух

В окружающем нас воздухе всегда находится некоторое количество водяного пара. *Абсолютная влажность* воздуха — масса водяного пара, содержащегося в объеме 1 м^3 влажного воздуха. *Относительной влажностью* воздуха называется отношение имеющейся абсолютной

влажности к максимально возможной абсолютной влажности при данном давлении и температуре, когда воздух насыщен водяным паром. Относительная влажность определяется в процентах.

Идеальные и реальные газы

	Идеальный газ	Реальный газ (уравнение Ван-дер-Ваальса)
Уравнение состояния (для одного моля)	$pV_\mu = RT$	$\left(p+\frac{a}{V_\mu^2}\right)(V_\mu - b) = RT$
Собственный объем молекул	$V_C = 0$	$V_C = b/4$
Внутреннее давление	$p_B = 0$	$p_B = a/V_\mu^2$
Внутренняя энергия (одного моля)	$U_\mu = C_V T$	$U = C_V T - a/V_\mu$
Двухфазное равновесное состояние пар — жидкость	Нет	Существуют такие состояния ниже критической температуры $T_к$ (см. рис. 2.12)

Примечание. Значения V_μ, p_B и U_μ приведены для одного моля.

7. Молекулярно-кинетическая теория

В основе молекулярно-кинетической теории лежит экспериментально доказанное утверждение, что все вещества состоят из молекул — наименьших частиц, сохраняющих все химические свойства вещества.

Молекулярное взаимодействие

Взаимодействие между атомами и молекулами осуществляется посредством электромагнитных сил между электронами и ядрами атомов (см. гл. V). Имеется 2 вида такого взаимодействия — силы притяжения и силы отталкивания; первые препятствуют растяжению тела, вторые препятствуют сжатию.

Потенциальная энергия

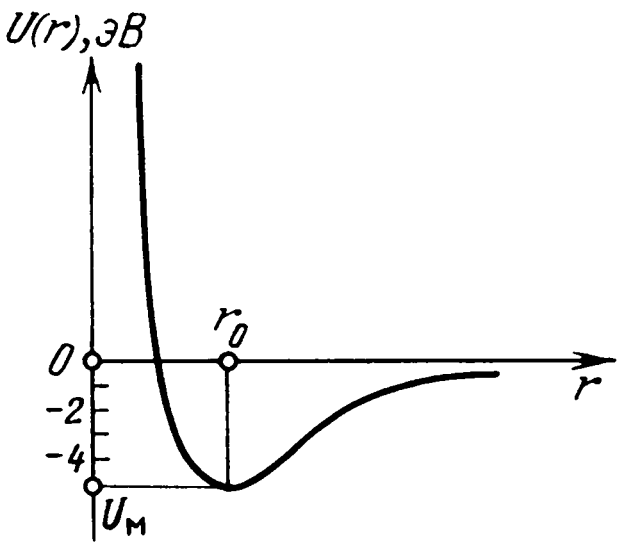


Рис. 2.9

Потенциальная энергия взаимодействия двух одинаковых атомов, образующих простейшие двухатомные молекулы (например H_2, O_2, N_2, Cl_2 и др.), представлена схематически на рис. 2.9 как функция расстояния r между ядрами атомов. Эта функция имеет глубокий минимум $U_м$ при значениях $r=r_0$; на расстояниях $r<r_0$ происходит отталкивание, на расстояниях $r>r_0$ атомы притягиваются; на расстояниях $r=r_0$ молекулы находятся в устойчивом равновесии; приближенные значения r_0 и $U_м$

$$r_0=0{,}7\div 2{,}0\cdot 10^{-8}\text{ см},$$

$$U_м=4\div 8\text{ эВ}.$$

Потенциальная энергия взаимодействия молекул графически представляется аналогичными кривыми, однако $U_м$ имеет меньшие значения:

$$U_м=0{,}01\div 0{,}1\text{ эВ}.$$

Молекулярно-кинетическая модель идеального газа

- молекулы движутся хаотически и имеют различные скорости;
- соударения молекул между собой и стенками сосуда упругие;
- между молекулами отсутствуют силы взаимодействия;
- собственный объем всех молекул мал по сравнению с объемом сосуда, в котором находится газ.

Средняя длина свободного пробега

Средний путь, который проходят молекулы между двумя ближайшими соударениями (рис. 2.10):

$$l=kT/(\sqrt{2}\,\pi\sigma^2 p), \qquad (2.24)$$

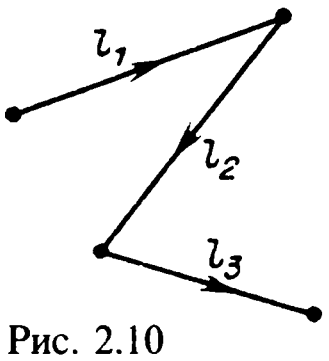


Рис. 2.10

$k=R/N$ — постоянная Больцмана, R — универсальная газовая постоянная, N — число молекул в одном моле (*постоянная Авогадро*); σ — диаметр молекулы, p — давление; T — температура.

Распределение Максвелла

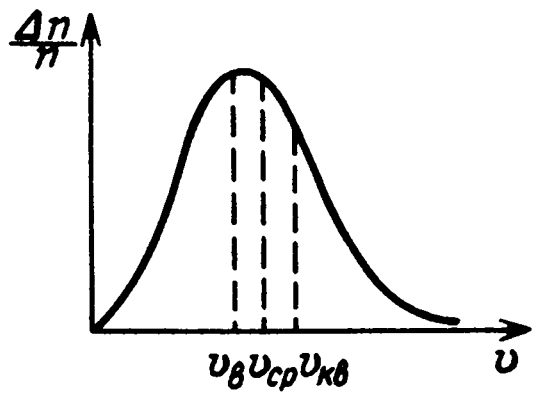


Рис. 2.11

Распределение молекул идеального газа по скоростям (функция распределения). Это распределение представлено на рис. 2.11. По оси ординат отложены значения $\Delta n/n$, по оси OX указаны скорости молекул; n — количество молекул в данном объеме; Δn — количество молекул, которые имеют скорости от v до $v+\Delta v$.

Средняя скорость молекул

$$v_{ср}=\sum|v_i|/n=\sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \qquad (2.25)$$

μ — молярная масса, $|v_i|$ — модули скоростей молекул, n — количество молекул в данном объеме.

Средняя квадратичная скорость

$$v_{кв}=\sqrt{\sum v_i^2/n}=\sqrt{\frac{3RT}{\mu}}. \qquad (2.26)$$

Наиболее вероятная скорость

Скорость, которую имеет наибольшее число молекул:

$$v_в=\sqrt{\frac{2RT}{\mu}}. \qquad (2.27)$$

Давление газа

$$p=\frac{1}{3}n_0 mv_{кв}^2=n_0 kT, \qquad (2.28)$$

n_0 — число молекул в объеме 1 м^3 (концентрация молекул); m — масса одной молекулы, k — постоянная Больцмана.

Основное уравнение

$$pV = 2E_к/3 = Mv_{кв}^2/3, \qquad (2.29)$$

$E_к$ — кинетическая энергия молекул в объеме V, M — масса газа, $v_{кв}$ — средняя квадратичная скорость.

Средняя кинетическая энергия молекулы

$$\varepsilon_k = 3kT/2, \qquad (2.30)$$

k — постоянная Больцмана.

Кинетическая энергия моля газа

$$E_к = 3RT/2, \qquad (2.31)$$

R — молярная газовая постоянная.

Тепловой поток

Теплота, которая передается через поверхность за время 1 секунда.

Теплопроводность

Тепловой поток, обусловленный обменом энергии между частицами (молекулами, атомами, электронами, ионами), которые имеют различные энергии; при этом процессе передается энергия от участков среды с более высокой температурой к участкам среды с меньшей температурой.

Градиент температур

Векторная величина, модуль которой равен

$$\lim_{\Delta l \to 0} (\Delta T/\Delta l) = dT/dl,$$

$\Delta T = T_1 - T_2$ — разность температур между точками, расстояние между которыми по направлению наибольшего изменения температуры равно Δl. Этот вектор направлен в сторону увеличения температуры.

Закон Фурье

При теплопроводности передается через поверхность площадью S за время Δt количество теплоты

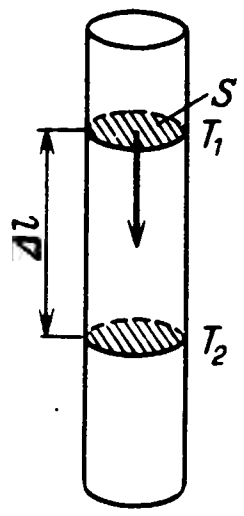


Рис. 2.12

$$\Delta Q = -\lambda S (dT/dl)\,\Delta t, \qquad (2.32)$$

λ — коэффициент теплопроводности (теплопроводность), равный тепловому потоку через сечение площадью 1 м^2 при градиенте температуры 1 кельвин на метр. Предполагается, что сечение расположено перпендикулярно градиенту температуры. Минус указывает, что теплота передается в направлении уменьшения температуры.

Теплопроводность идеального газа

$$\lambda = \rho v_{ср}\, c_V\, l/3, \qquad (2.33)$$

ρ — плотность, $v_{ср}$ — средняя скорость молекул, l — средняя длина свободного пробега, c_V — удельная теплоемкость при постоянном объеме.

Диффузия

Перенос вещества молекулярным движением в среде, различные элементарные объемы которой имеют различную плотность (или концентрацию частиц).

Градиент плотности

Векторная величина, модуль которой равен

$$\lim_{\Delta l \to 0} (\Delta\rho/\Delta l) = d\rho/dl,$$

$\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$ — разность плотностей в элементарных объемах, расстояние между которыми по направлению наибольшего изменения плотности равно Δl (рис. 2.13).

Градиент плотности направлен в сторону увеличения плотности.

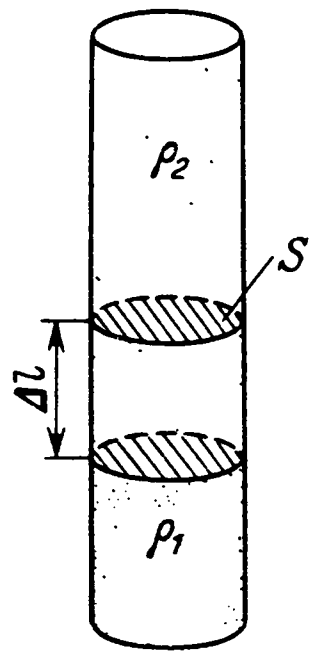


Рис. 2.13

Коэффициент диффузии

Масса ΔM вещества, которое перемещается при диффузии через плоскость площадью S за время Δt, рассчитывается по формуле (закон Фика)

$$\Delta M = -DS\Delta t d\rho/dl, \qquad (2.34)$$

$d\rho/dl$ — градиент плотности, D — *коэффициент диффузии* — величина, равная массе диффундирующего вещества через плоскость площадью 1 м^2 за время 1 с при градиенте плотности 1 кг/м^4; предполагается, что плоскость расположена перпендикулярно градиенту плотности.

Минус указывает, что вещество при диффузии перемещается в сторону уменьшения плотности.

Коэффициент диффузии в идеальном газе

$$D = v_{ср} l/3, \qquad (2.35)$$

$v_{ср}$ — средняя скорость молекул, l — средняя длина свободного пробега.

Вязкость идеального газа

$$\eta = \rho v_{ср} l/3 \qquad (2.36)$$

(о вязкости см. гл. I, п. 22).

8. Свойства жидкостей

Поверхностное натяжение

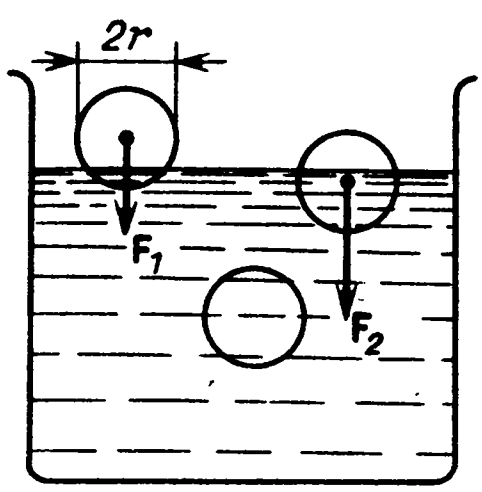


Рис. 2.14

Силы, действующие на молекулы, расположенные вблизи свободной поверхности, направлены внутрь жидкости.

На рис. 2.14 r — радиус молекулярного взаимодействия, равный расстоянию, на котором действуют молекулярные силы. Эти силы обуславливают особое состояние тонкого слоя жидкости вблизи ее свободной поверхности; они явля-

ются причиной возникновения поверхностного натяжения. Силы поверхностного натяжения направлены вдоль поверхностного слоя.

Сила поверхностного натяжения

$$F_{\text{п}} = \alpha l, \tag{2.37}$$

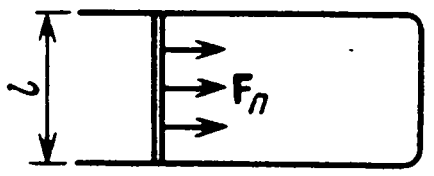


Рис. 2.15

l — длина участка контура, ограничивающего свободную поверхность (см. рис. 2.15), α — *поверхностное натяжение*, равное силе, приложенной перпендикулярно к единичному элементу длины контура по касательной к поверхности.

Капиллярные явления

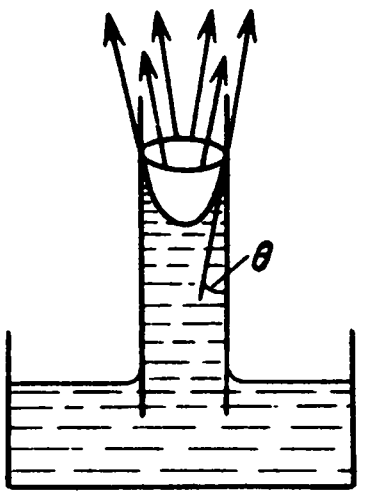


Рис. 2.16

Вследствие различия между молекулярными силами в жидкостях и твердых телах свободная поверхность жидкости у стенок сосуда искривляется (см. рис. 2.16).

Угол смачивания θ определяется как угол между касательной к свободной поверхности жидкости и поверхностью тела в жидкости. В жидкостях, для которых $\theta < \pi/2$, уровень поднимается на высоту h по сравнению со свободной поверхностью этой же жидкости; если $\theta > \pi/2$, то уровень жидкости опускается. Высота уровня в капиллярных трубках с круглым сечением и малого диаметра

$$h = \frac{2\alpha \cos\theta}{r\rho g}, \tag{2.38}$$

r — радиус капилляра, ρ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения.

Избыточное давление

Под искривленной поверхностью свободной поверхности жидкость подвержена дополнительному давлению (избыточное давление); оно

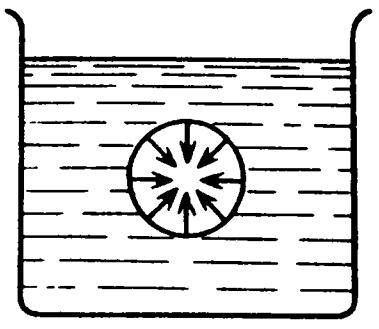


Рис. 2.17

рассчитывается по формуле

$$p_и = 2\alpha/r, \qquad (2.39)$$

r — радиус кривизны сферической поверхности мениска.

Для сферического пузырька газа в жидкости

$$p_и = 2\alpha/r, \qquad (2.40)$$

для сферического мыльного пузырька в воздухе

$$p_и = 4\alpha/r. \qquad (2.41)$$

9. Кристаллические и аморфные тела

Твердые тела разделяются на два вида — аморфные и кристаллические. *Аморфные тела* сохраняют свою форму (например, стекло, смолы, пластмассы), но по другим свойствам они подобны жидкостям с очень большой вязкостью, которая уменьшается с увеличением температуры; поэтому при увеличении температуры аморфные тела постепенно размягчаются и становятся обычными жидкостями.

Кристаллические структуры (кристаллы)

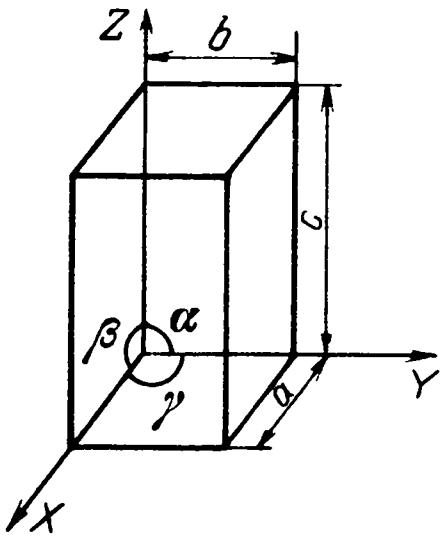


Рис. 2.18

Кристалл — однородное анизотропное тело, в котором частицы (ионы, атомы, молекулы) расположены в пространстве правильно построенными цепочками, плоскими сетками и трехмерными решетками; эти частицы совершают колебания относительно положения равновесия.

У кристаллических тел переход в жидкое состояние происходит скачком при определенной температуре плавления.

Кристаллическую решетку кристалла можно получить переносом *элементарной ячейки* в трех направлениях. Геометрическая форма элементарной ячейки определяется тремя ребрами a, b, c и тремя углами между ними α, β, γ (см. рис. 2.18); имеется 14 типов

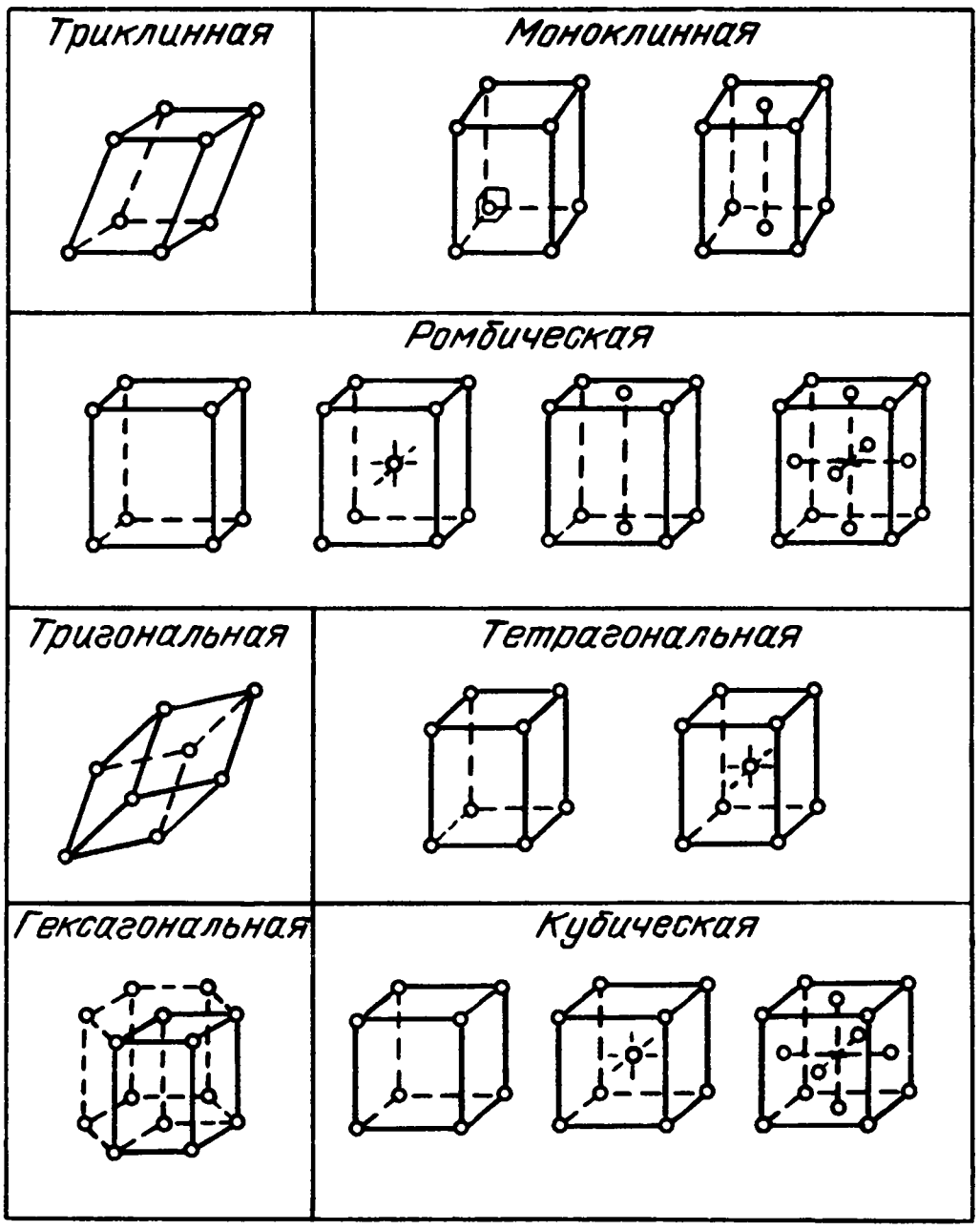


Рис. 2.19

таких решеток (рис. 2.19). Вещества, состоящие из множества хаотически ориентированных малых кристаллов, называются *поликристаллическими.*

10. Жидкие кристаллы

Что такое жидкие кристаллы

Ряд органических веществ переходят из жидкого состояния в твердое кристаллическое не сразу, а через ряд промежуточных состояний (фаз), которым присущи некоторые свойства как жидкостей, так и кристаллов.

Такие состояния называются *жидкими кристаллами* (или *мезофазами*).

Лиотропные и термотропные жидкие кристаллы

Лиотропные жидкие кристаллы образуются в коллоидных растворах (например, водных растворах многих полипептидов; такие жидкие кристаллы имеют ряд разновидностей).

Термотропные жидкие кристаллы образуются при плавлении органических кристаллов с удлиненными молекулами.

Нематики, смектики и холестерики

Термотропные жидкие кристаллы делятся на три категории: нематические (нематики — НЖК), смектические (смектики — СЖК), холестерические (холестерики — ХЖК).

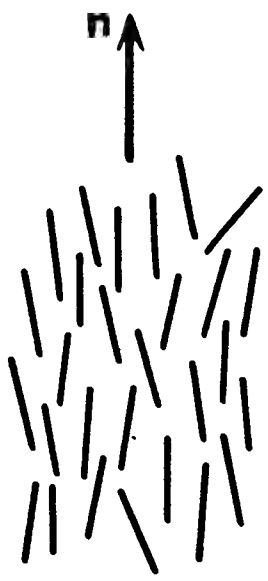


Рис. 2.20

Схема расположения молекул в НЖК представлена на рис. 2.20; длинные оси молекул в среднем параллельны, в результате чего образуется выделенное направление, называемое директором **n**; центры молекул расположены хаотически, как в жидкостях.

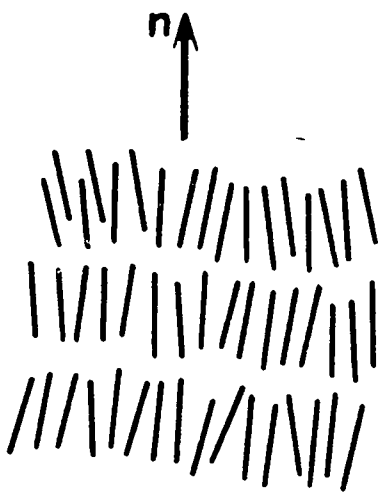


Рис. 2.21

Схема расположения молекул в СЖК представлена на рис. 2.21; длинные оси молекул упорядочены как в нематических ЖК, но центры молекул в среднем расположены на плоскостях, находящихся друг от друга на одинаковых расстояниях, т. е. они имеют слоистую структуру; СЖК имеют несколько разновидностей.

Холестерическая фаза жидких кристаллов (ХЖК) является искаженной формой нематиков; в этой фазе молекулы имеют преимущественную ориентацию по направлению директора, но направление последнего изменяется при переходе от одного слоя к другому регулярным образом, что может быть представлено винтообразной

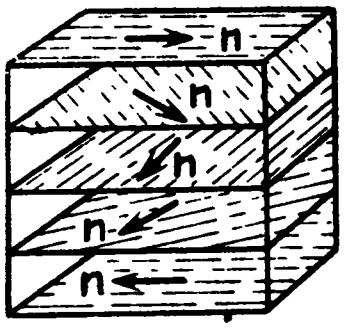


Рис. 2.22

структурой с шагом около 200—300 нм (рис. 2.22).

В обычных условиях кристалл представляет собой как бы поликристалл, состоящий из зерен жидких кристаллов, у которых директоры ориентированы хаотически. В магнитных и электрических полях можно получить жидкий «монокристалл».

Примеры НЖК и СЖК

Типы соединений	Температура переходов, °С
Нематики	
п-азоксианизол (ППА)	KN—118, NI—135,5
п-метоксибензилиден-*п*-бутиланилин (МББА)	KN—22, NI—47
п-гексилокси-*о*-гидрокси-*п*-бутилазобензол	KN—8, NI—82
Смектики	
п, *п'*-динонилазобензол	K—38, S_B—41, S_A—541
п, *п'*-дигептилгептилоксиазобензол (ГОАБ)	K—74,5, S_C—95,5, N—1241
холестерил—миристат	K—71, S_A—81

Примечание: KN—переход из кристалла в нематик; NI—переход из нематика в изотропную жидкость; K—температура кристаллизации; S—температура перехода в смектическое состояние (индексы указывают модификации *A*, *B*, *C*); N—переход в нематик.

11. Полимеры

Полимерные цепи

Полимерами называются вещества, молекулы которых состоят из большого числа атомов (или групп атомов), образующих длинные цепи—*полимерные цепи*. Полимерные цепи называются *макромолекулами*. Исходное вещество, из которого образуются полимерные цепи, называется *мономером*. Например, из мономера—этилена образуется

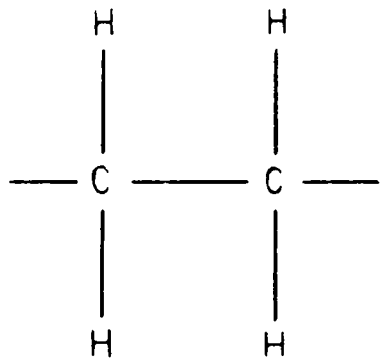


Рис. 2.23

полимер — полиэтилен. Число звеньев в полимерной цепи называется *степенью полимеризации*. Степень полимеризации может изменяться в пределах от нескольких единиц до 10 000 и больше; относительные молекулярные массы полимеров имеют значения $10^4 \div 10^6$. Звено цепи полиэтилена приведено на рис. 2.23.

Степень кристалличности

Полимеры состоят из кристаллических и аморфных областей; отношение объема кристаллических областей к объему всего образца называется *степенью кристалличности*. Степень кристалличности зависит от способа получения полимера. Например, в полиэтилене высокой плотности ($\rho = 0{,}919 \div 0{,}973$ г/см^3) степень кристалличности изменяется в пределах от $60 \div 90\%$, в полиэтилене низкой плотности ($\rho = 0{,}913 \div 0{,}934$ г/см^3) степень кристалличности составляет $40 \div 60\%$.

Температура плавления

У полимеров нет определенной температуры плавления. Например, натуральный каучук кристаллизуется в температурном интервале от -25 °C до 45 °C. Однако при медленной кристаллизации (и плавлении) полимеров с высокой степенью кристалличности можно получить равновесную температуру плавления. Например, температура плавления у полиэтилена находится в интервале температур $102 \div 137$ °C, у полипропилена $160 \div 170$ °C, у фторопласта-4 около 327 °C.

Аморфные полимеры

Аморфные полимеры с линейными цепочками молекул могут нахо-

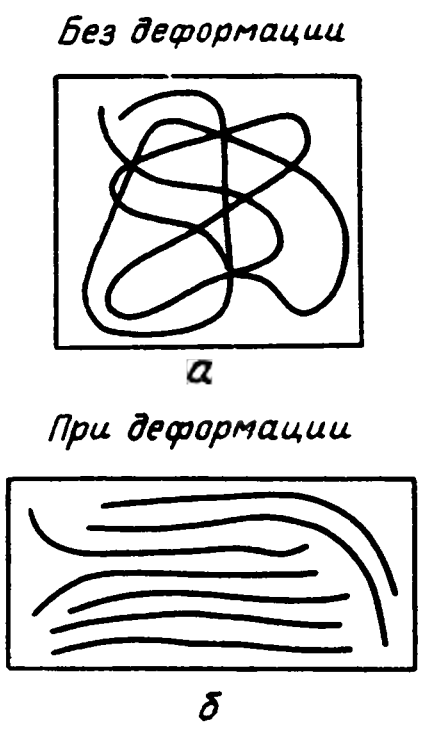


Рис. 2.24

диться в трех состояниях: стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем.

В стеклообразном состоянии совершаются колебания атомов, образующих полимерную цепь.

В высокоэластическом состоянии происходят (наряду с колебаниями атомов) крутильные колебания отдельных звеньев, вследствие чего полимерная цепь может изгибаться.

Вязкоупругое состояние характеризуется подвижностью макромолекулы (полимерной цепи) в целом.

Переход из одного состояния в другое происходит в некотором диапазоне температур. *Температурой стеклования* называется средняя температура перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние; средняя температура перехода из высокоэластического состояния в вязкотекучее называется *температурой текучести*; $T_{пл}/T_с = 1{,}5$ для несимметричных цепей; $T_{пл}/T_с = 2$ для симметричных цепей ($T_{пл}$ — температура плавления, $T_с$ — температура стеклования).

Закон Гука

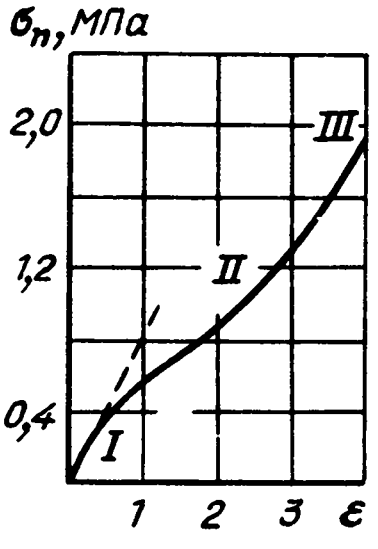


Рис. 2.25

Выполняется только при малых деформациях (*I* участок, рис. 2.25), на *II* участке малым изменениям напряжения соответствуют большие деформации, модуль Юнга, например, для каучука равен приблизительно $2 \cdot 10^5$ Па, т. е. того же порядка, что и у газов. На *III* участке резко увеличивается напряжение при незначительных деформациях.

12. Плазма

Что такое плазма

Газ, атомы и молекулы которого в значительной мере ионизированы, называется *плазмой.* Вещество при температурах 10^4 К и выше является плазмой. Однако не всякий ионизированный газ является плазмой; ионизированный газ называется плазмой, если величина $\delta = kT/(4\pi n q_i^2)$ значительно меньше размеров сосуда, в котором находится газ (n — концентрация заряженных частиц в плазме, q_i — заряд одного иона, T — температура, k — постоянная Больцмана).

Диффузия ионов

Определяется так же, как и диффузия молекул идеальных газов; коэффициент диффузии ионов в плазме

$$D_i = v_i l_i / 3, \qquad (2.42)$$

v_i и l_i — средняя скорость и средняя длина свободного пробега ионов.

Теплопроводность

Главную роль в переносе теплоты в плазме играют электроны; теплопроводность, обусловленная электронами,

$$\lambda_e = 1{,}24 \cdot 10^{-11} T^{5/2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}). \qquad (2.43)$$

Например, при $T \simeq 10^5$ К теплопроводность водородной плазмы больше теплопроводности серебра при комнатной температуре.

Тепловое давление плазмы

$$p = (n_i + n_e) k T, \qquad (2.44)$$

n_i — концентрация ионов, n_e — концентрация электронов.

Глава III

Электродинамика

В этой главе изучаются различные виды электромагнитного взаимодействия: к ним относятся взаимодействие заряженных тел (неподвижных и движущихся относительно системы отсчета), проводников с электрическими токами (частный случай взаимодействия движущихся заряженных частиц), магнитов между собою, а также взаимодействие между магнитами и проводниками с электрическими токами. Все виды электромагнитного взаимодействия осуществляются посредством электромагнитного поля.

1. Электрическое поле неподвижных зарядов (электростатика)

Электрический заряд

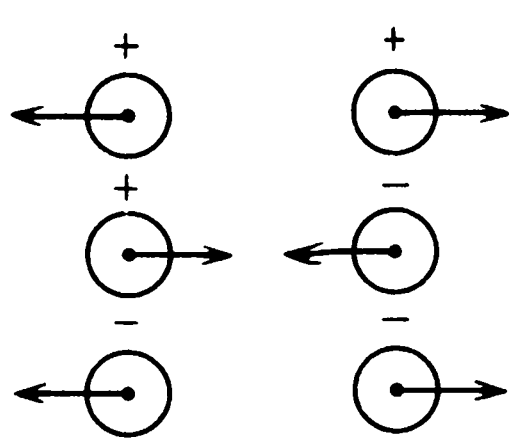


Рис. 3.1

Источник электромагнитного поля; носителями зарядов являются электроны, протоны и другие элементарные частицы (см. гл. V). Различают два рода электрических зарядов — *положительные* и *отрицательные*. Положительными называются заряды, возникающие на стекле, натертом кожей; отрицательными — заряды, возникающие на янтаре, натертом мехом. Тела, заряженные одноименными зарядами, отталкиваются; тела, имеющие разноименные заряды, притягиваются друг к другу (рис. 3.1).

Закон сохранения зарядов

$$\sum_i Q_i = \text{const}.$$

Алгебраическая сумма зарядов в изолированной системе сохраняется постоянной; носители зарядов могут перемещаться от одного те-

ла к другому или смещаться внутри тела, в молекуле, атоме; заряд не зависит от системы отсчета.

Материальные носители зарядов

Носителями зарядов в различных средах могут быть электроны, оторванные от атомов (например, в металлах), ионы — части молекул или атомов, имеющие положительные и отрицательные заряды (например, в электролитах и газах), и другие частицы, имеющие заряды.

Элементарный заряд

$e \simeq 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

По модулю любой заряд кратен заряду электрона (или протона). Заряд электрона — отрицательный, заряд протона — положительный; по модулю заряды этих частиц равны e.

Точечные заряды

Точечными зарядами называются заряженные тела, размерами которых можно пренебречь по сравнению с расстоянием до точки, в которой определяется действие данного заряда.

Закон Кулона

Рис. 3.2

Сила, с которой действуют друг на друга два точечных заряда, рассчитывается по формуле (закон Кулона)

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{Q_1 Q_2 \mathbf{r}_0}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_{12}^2} \text{(СИ)},$$

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{Q_1 Q_2}{\varepsilon r_{12}^2} \mathbf{r}_0 \text{(СГС)}, \qquad (3.1)$$

$\mathbf{F}_{12}$ — сила, действующая на заряд Q_2, находящийся в поле заряда Q_1, $\mathbf{r}_{12}$ — вектор, проведенный от заряда Q_1 к заряду Q_2 (рис. 3.2), $\mathbf{r}_0$ — единичный вектор по направлению $\mathbf{r}_{12}$, ε_0 — электрическая по-

стоянная,

$$\varepsilon_0 = 1/(36\pi \cdot 10^9)\frac{\Phi}{\text{м}} = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\frac{\Phi}{\text{м}}\text{(СИ)};$$

в системе СГС $\varepsilon_0 = 1$ (величина безразмерная); ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой расположены заряды. Сила $\mathbf{F}_{21}$, действующая на заряд Q_1, находящийся в поле заряда Q_2, равна по модулю силе $\mathbf{F}_{12}$, но векторы $\mathbf{F}_{12}$ и $\mathbf{F}_{21}$ всегда имеют противоположные направления; линия их действия проходит через заряды (см. рис. 3.2).

Электрический диполь

Два разноименных точечных заряда, равных по модулю.

Свойства диполя определяются *электрическим моментом*

$$\mathbf{p}_i = Q\mathbf{l}, \qquad (3.2)$$

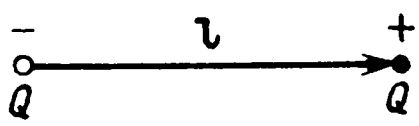


Рис. 3.3

Q — заряд, $\mathbf{l}$ — вектор, проведенный от отрицательного к положительному заряду; модуль $\mathbf{l}$ равен расстоянию между зарядами Q.

Напряженность электрического поля

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{Q} \qquad (3.3)$$

Сила, действующая в данной точке поля на тело, имеющее положительный заряд 1 Кл.

Направление вектора напряженности электрического поля $\mathbf{E}$ совпадает с направлением силы $\mathbf{F}$, действующей на тело, имеющее положительный заряд.

Линии напряженности электрического поля

Это такие линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением векторов напряженности $\mathbf{E}$.

Электрическое смещение

Векторная величина, равная произведению

$$\varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E} = \mathbf{D}. \qquad (3.4)$$

Электрическое поле в диэлектрике

Создается внешним полем (полем внешних зарядов) $\mathbf{E}_0$ и полем связанных (поляризационных зарядов) зарядов $\mathbf{E}'$:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'. \qquad (3.5)$$

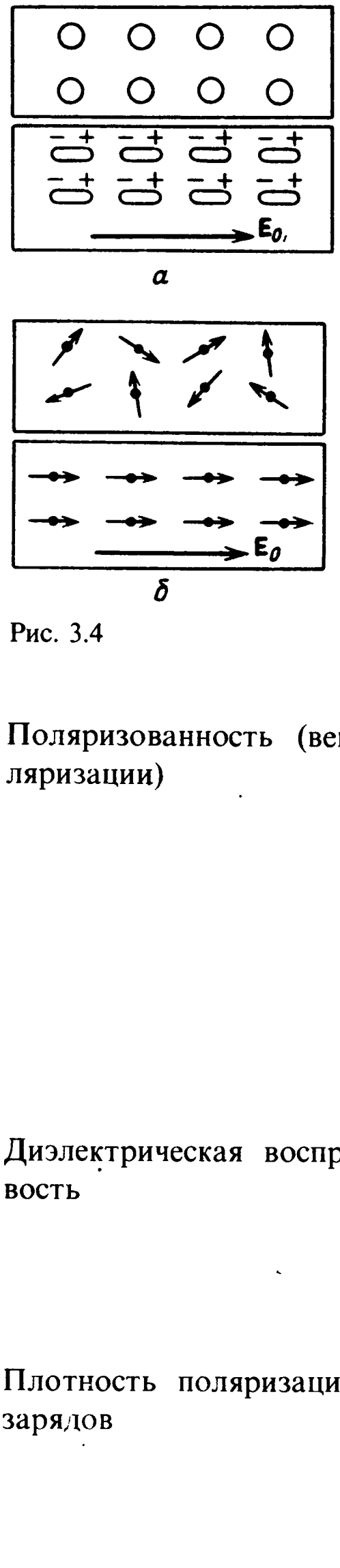


Рис. 3.4

Связанные заряды на поверхности диэлектрика образуются вследствие или смещения носителей зарядов в молекулах (в неполярных молекулах), или в результате ориентации дипольных моментов полярных молекул внешним электрическим полем (см. рис. 3.4). Это явление называется *поляризацией диэлектрика*. На рис. 3.4 приводится схема образования дипольных моментов неполярных молекул и ориентации дипольных моментов полярных молекул внешним электрическим полем.

Поляризованность (вектор поляризации)

$$\mathbf{P} = \frac{\Sigma \mathbf{p}_i}{V} = n\langle \mathbf{p} \rangle. \qquad (3.6)$$

Величина, равная векторной сумме электрических моментов диполей в единичном объеме диэлектрика. $\mathbf{p}_i$ — электрический дипольный момент одной молекулы, n — концентрация молекул, $\langle \mathbf{p} \rangle$ — средний дипольный момент одной молекулы, V — объем диэлектрика.

Диэлектрическая восприимчивость

В изотропном диэлектрике

$$\mathbf{P} = \varkappa \varepsilon_0 \mathbf{E}; \qquad (3.7)$$

безразмерная величина $\varkappa$ называется *диэлектрической восприимчивостью*.

Плотность поляризационных зарядов

$$\sigma_{\text{п}} = P_{\text{п}}, \qquad (3.8)$$

P_n — проекция вектора **P** на внешнюю нормаль к поверхности диэлектрика.

Диэлектрическая проницаемость

В изотропной среде

$$\mathbf{D}=\varepsilon_0\mathbf{E}+\mathbf{P}=\varepsilon\varepsilon_0\mathbf{E}, \qquad (3.9)$$

$\varepsilon=1+\varkappa$ — *относительная диэлектрическая проницаемость*. Эта величина является основной электрической характеристикой диэлектрика.

Связь между различными характеристиками электрического поля в диэлектрике

В пространстве, полностью заполненном изотропным диэлектриком,

$$\mathbf{E}=\mathbf{E}_0/\varepsilon, \qquad (3.10)$$

$$\mathbf{E}'=-\mathbf{P}/\varepsilon_0, \qquad (3.11)$$

$$\varphi=\varphi_0/\varepsilon, \qquad (3.12)$$

E — напряженность поля в диэлектрике; $\mathbf{E}_0$ — напряженность поля при отсутствии диэлектрика; $\mathbf{E}'$ — напряженность поля поляризационных зарядов, **P** — поляризованность (вектор поляризации); φ — потенциал поля в диэлектрике, φ_0 — потенциал поля при отсутствии диэлектрика.

Проводники в электрическом поле

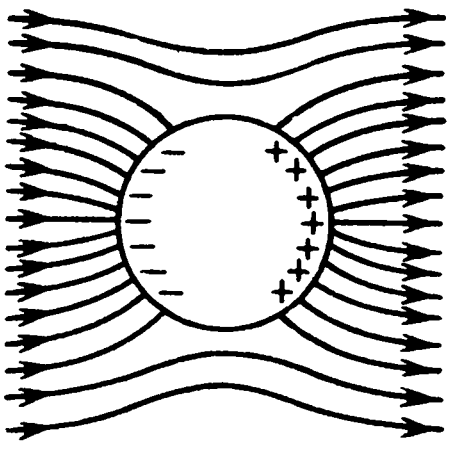


Рис. 3.5

На поверхности проводника, находящегося в электрическом поле, наводятся (индуцируются) заряды; эти заряды (положительные и отрицательные) распределяются по поверхности таким образом, что напряженность поля внутри проводника будет равна нулю, а поверхность проводника является эквипотенциальной (см. ниже). На рис. 3.5 показано изменение однородного электростатического поля проводящим шаром.

Потенциал электростатического поля

$$\varphi=\frac{A}{Q} \qquad (3.13)$$

Потенциальная энергия взаимодействия электрического поля с единичным положительным зарядом, расположенным в данной точке поля. Потенциал определяется с точностью до постоянной. В физике обычно принимают, что потенциал в бесконечно удаленной точке равен нулю. Потенциал электростатического поля равен работе A, совершаемой силами электрического поля при перемещении тела, имеющего положительный заряд 1 Кл, из данной точки в бесконечность, или работе, совершаемой внешними силами при перемещении того же самого тела из бесконечности в данную точку поля.

Разность потенциалов между точками

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{Q}. \qquad (3.14)$$

Величина, равная работе, которую совершают силы электрического поля при перемещении тела, имеющего положительный заряд 1 Кл, из одной точки в другую.

Объемная плотность энергии электрического поля

$$w = \varepsilon_0 \varepsilon E^2/2. \qquad (3.15)$$

Величина, равная

$$\lim_{\Delta V \to 0} (\Delta W/\Delta V) = dW/dV = w,$$

ΔW — энергия электрического поля, заключенная в элементарном объеме ΔV, E — напряженность электрического поля.

Эквипотенциальная поверхность

Поверхность, во всех точках которой имеется одинаковый потенциал, называется *эквипотенциальной поверхностью* (или поверхностью равного потенциала).

Напряженность и градиент потенциала

Линии напряженности перпендикулярны эквипотенциальным поверх-

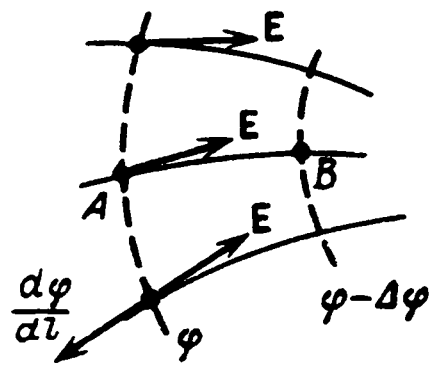


Рис. 3.6

ностям. Если между двумя близко расположенными точками A и B разность потенциалов равна $\Delta\varphi$ (рис. 3.6), а расстояние между ними по линии напряженности равно Δl, то

$$\lim_{\Delta l\to 0}\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}=d\varphi/dl=-E.$$

Величина $\Delta\varphi/\Delta l$ (точнее, $d\varphi/dl$) является модулем вектора, который называется *градиентом потенциала*; этот вектор направлен в сторону увеличения потенциала.

Электроемкость конденсаторов

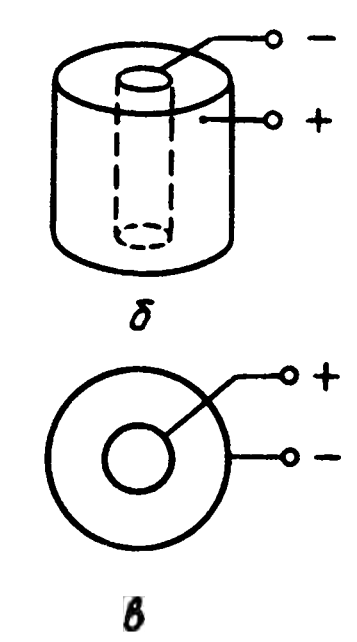


Рис. 3.7

Проводники, между которыми имеется электрическое поле, все линии напряженности которого начинаются на одном проводнике и заканчиваются на другом, называются *конденсаторами*, а сами проводники — обкладками конденсатора.

Электроемкость конденсатора — величина, равная заряду на одной из обкладок конденсатора при разности потенциалов 1 В между его обкладками:

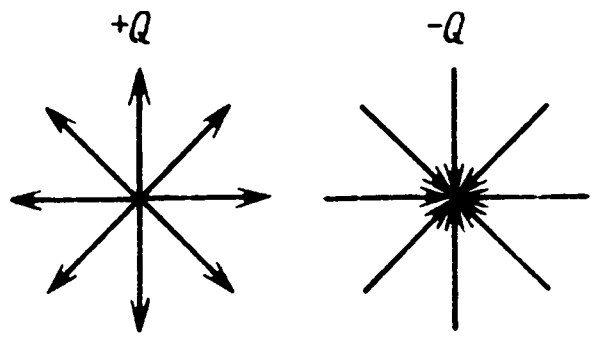
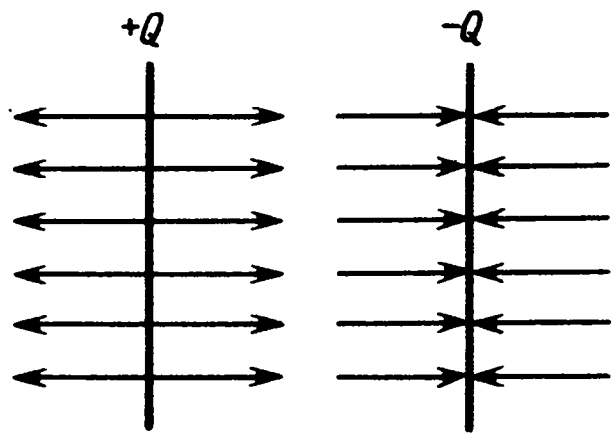
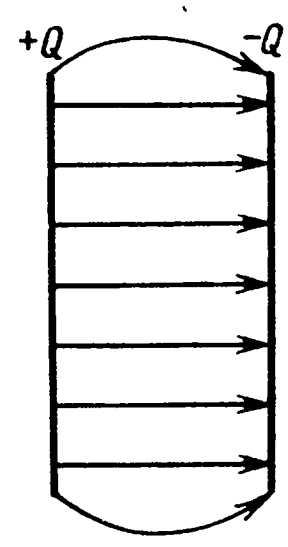
$$C=Q/(\varphi_1-\varphi_2), \qquad (3.16)$$

Q — заряд на одной из обкладок конденсатора при разности потенциалов $(\varphi_1-\varphi_2)$ между ними. Конденсаторы различают по форме проводящих поверхностей: плоские, цилиндрические и сферические (рис. 3.7).

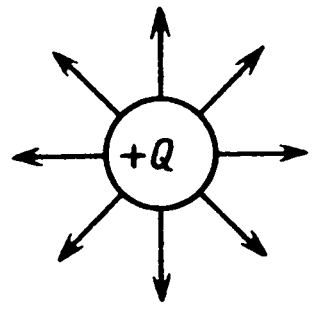
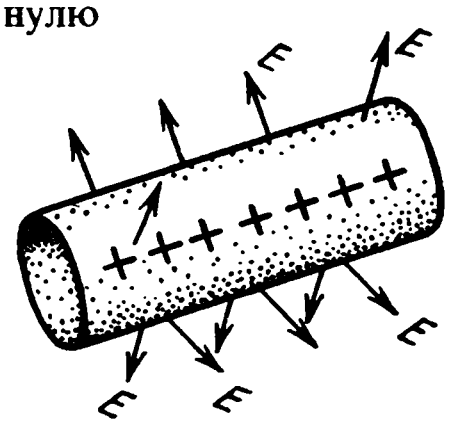
Единицы:

заряд — кулон, Кл;
напряженность электрического поля — вольт на метр, В/м;
потенциал, разности потенциалов, ЭДС — вольт, В;
электроемкость — фарад, Ф;
объемная плотность энергии — джоуль на кубический метр, Дж/м^3.

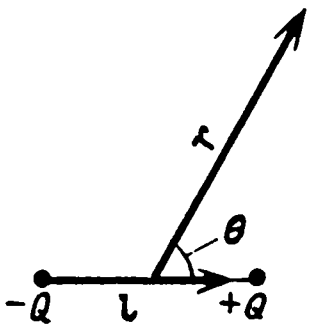
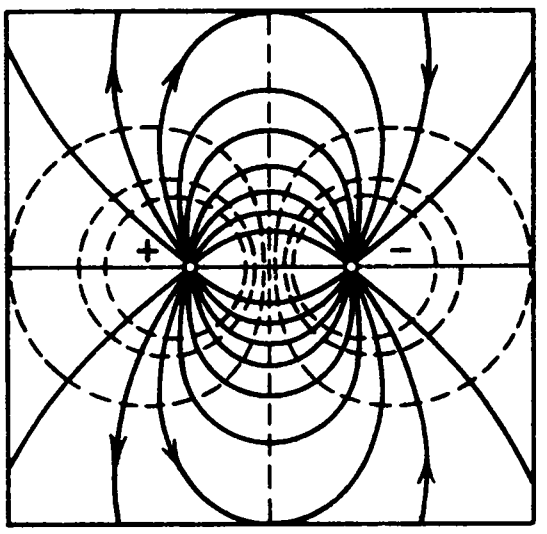
2. Напряженность электрического поля

Тело	Точка в пространстве	Напряженность, линии напряженности
Материальная точка	На расстоянии r	$E_т = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}$ (3.17) 
Плоскость	С любой стороны (σ — поверхностная плотность заряда)	$E_п = \dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon}$ (3.18) 
Две параллельные плоскости с зарядами $+Q$ и $-Q$	Между плоскостями	$E_{\parallel} = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon}$ (3.19)
	Вне плоскостей	Равна нулю 

Продолжение

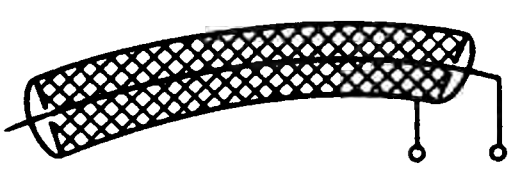
Тело	Точка в пространстве	Напряженность, линии напряженности
Сфера (шар) радиусом R	Вне сферы на расстоянии r от ее центра ($r \geqslant R$)	$E_{сф} = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}$ (3.20)
	Внутри сферы ($r < R$)	Равна нулю 
Проводник	Вблизи поверхности	$E_{пр} = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon}$
Равномерно заряженный длинный цилиндр (полый)	Вне цилиндра на расстоянии r от оси	$E_{ц} = \dfrac{\tau}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r}$, (3.21) τ — линейная плотность заряда
	Внутри цилиндра	Равна нулю 
Сплошной стержень, заряженный равномерно по объему	Вне стержня на расстоянии r от оси ($r \geqslant R$)	$E_{ст} = \dfrac{\tau}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r}$ (3.22)
	Внутри стержня (R — радиус поперечного сечения)	$E'_{ст} = \dfrac{\tau r}{2\pi\varepsilon_0 R^2}$ (3.23)

Продолжение

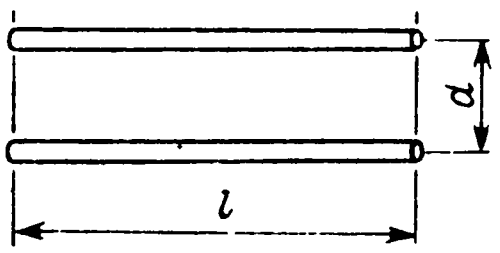
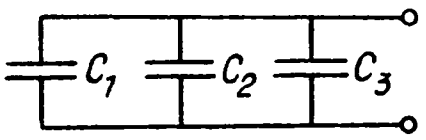
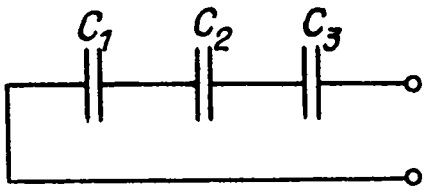
Тело	Точка в пространстве	Напряженность, линии напряженности
Диполь 	На расстоянии $r \geqslant l$, p — модуль момента диполя	$E_д = \frac{\sqrt{1+3\cos^2\theta}}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^3} p,$ (3.24) θ — угол между векторами **p** и **r** 

Примечание. Поверхностная плотность заряда $\sigma = Q/S$ (Q — заряд, распределенный на поверхности площадью S); линейная плотность заряда $\tau = Q/l$ (Q — заряд на боковой поверхности цилиндра, длина которого равна l).

3. Электроемкость конденсаторов и проводников

Конденсаторы	Электроемкость
Плоский конденсатор	$C = \varepsilon_0 \varepsilon S/d,$ (3.25) S — площадь одной пластины; d — расстояние между ними
Цилиндрический конденсатор; коаксиальный кабель 	$C_ц = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon l/(\ln(b/a)),$ (3.26) b — радиус внешнего цилиндра, a — радиус внутреннего цилиндра, l — длина
Сферический конденсатор	$C_{сф} = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon/(1/a - 1/b),$ (3.27) a, b — радиусы внутренней и внешней сферы

Продолжение

Конденсаторы	Электроемкость
Двухпроводная линия 	$C_{л}=\pi\varepsilon_0\varepsilon l/(\ln d/a)$, (3.28) l — длина линии, d — расстояние между осями параллельных проводников, r — их радиус
Проводник, параллельный плоскости Земли	$C_{г}=2\pi\varepsilon_0 l\Big/\left(\ln\dfrac{2h}{R}\right)$, h — высота над поверхностью, R — радиус сечения, $h\gg R$, l — длина проводника.
Параллельное соединение конденсаторов 	$C_{пар}=C_1+C_2+\ldots+C_n$, (3.29) C_1, $C_2 \ldots C_n$ — емкости конденсаторов
Последовательное соединение конденсаторов 	$C_{пос}^{-1}=C_1^{-1}+C_2^{-1}+\ldots+C_n^{-1}$. (3.30)

4. Постоянный электрический ток

Электрический ток — Упорядоченное движение носителей зарядов.

Сила постоянного электрического тока (сила тока) — Заряд, который переносится через площадь сечения проводника за время 1 с,

$$I=Q/t. \qquad (3.31)$$

Сила переменного электрического тока

$$I=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta Q}{\Delta t}=\frac{dQ}{dt}, \qquad (3.32)$$

ΔQ — заряд, который переносится за время Δt. Когда говорят о направлении тока, то имеют в виду направление вектора плотности тока.

Плотность тока

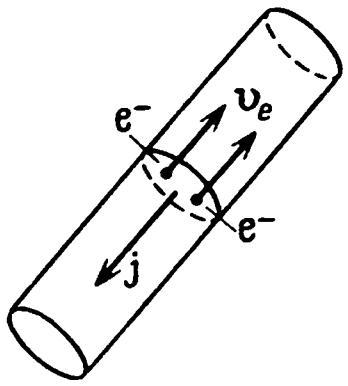


Рис. 3.8

Векторная величина, модуль которой равен отношению силы тока к площади сечения, перпендикулярного к скорости упорядоченного движения носителей заряда:

$$j = I/S. \qquad (3.33)$$

Направление вектора **j** совпадает с направлением вектора скорости упорядоченного движения носителей положительных зарядов:

$$\mathbf{j} = nq_+ \langle \mathbf{v} \rangle, \qquad (3.34)$$

q_+ — заряд одного из носителей, n — их концентрация, (количество носителей заряда в единичном объеме), $\langle \mathbf{v} \rangle$ — средняя скорость упорядоченного движения. При упорядоченном движении носителей отрицательных зарядов (например, электронов в металлах) вектор плотности тока **j** и вектор средней скорости $\mathbf{v}_0$ имеют противоположные направления (рис. 3.8).

Вообще, даже при наличии постоянного тока плотность не одинакова в различных точках поперечного сечения проводника. В этом случае плотность тока

$$j = dI/dS. \qquad (3.35)$$

Электрическое поле в проводнике с током

На поверхности проводника, по которому течет постоянный ток, размещаются неподвижные заряды, которые внутри проводника создают электрическое поле, в результате чего возникает электрический

ток. Поверхностная плотность этих зарядов на различных участках поверхности проводника имеет различные значения и знаки.

Вне проводника с током вблизи его поверхности вектор напряженности электрического поля имеет нормальную $\mathbf{E}_n$ и тангенциальную $\mathbf{E}_\tau$ составляющие; внутри проводника нормальная составляющая $\mathbf{E}_n = 0$, а тангенциальная составляющая имеет то же самое значение $\mathbf{E}_\tau$, что и вне проводника (рис. 3.9).

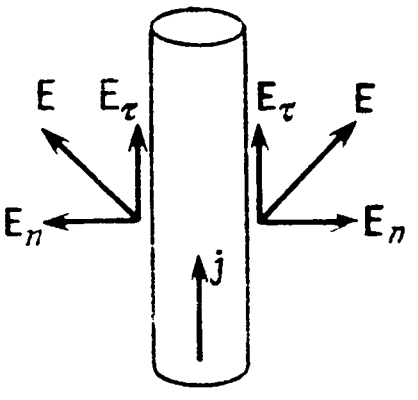


Рис. 3.9

Сторонние силы

Силы, которые перемещают на полюсы источника тока носители положительных и отрицательных зарядов; заряды, образующиеся на полюсах источника тока, в свою очередь, обеспечивают соответствующее распределение зарядов по всей поверхности проводника, который подключен к полюсам данного источника.

Природа сторонних сил может быть различной: вихревое электрическое поле в генераторах, межатомное взаимодействие на границах соприкосновения разнородных сред (в гальванических элементах и аккумуляторах) и т. п.

Электродвижущая сила (ЭДС)

Работа сторонних сил по перемещению такого количества носителей зарядов, которые переносят положительный заряд 1 Кл:

$$\mathscr{E} = A/Q. \qquad (3.36)$$

ЭДС равна разности потенциалов между клеммами разомкнутого источника.

Закон Ома

На участке цепи, где нет источников тока, сила тока в проводнике

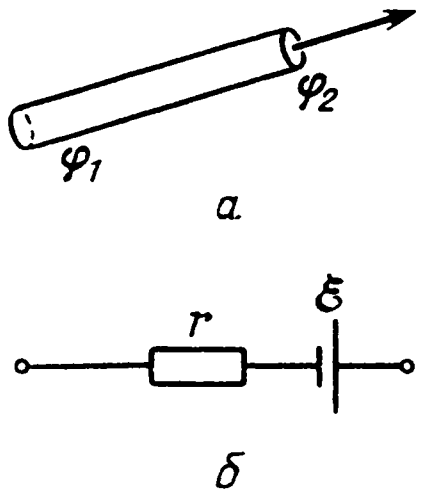


Рис. 3.10

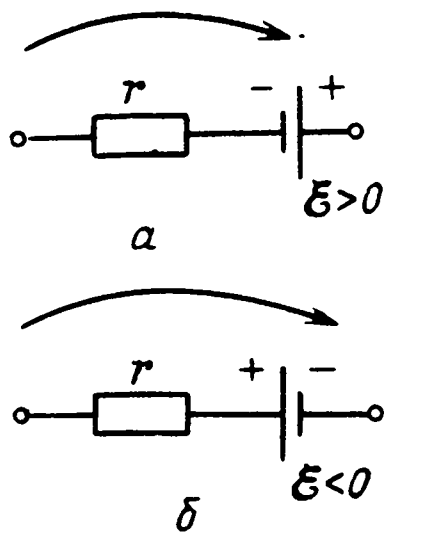


Рис. 3.11

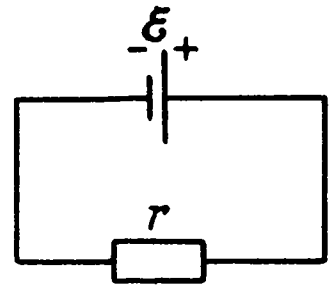


Рис. 3.12

пропорциональна разности потенциалов между его концами (рис. 3.10, *а*)

$$I=(\varphi_1-\varphi_2)/r. \qquad (3.37)$$

На участке цепи с источником тока сила тока (рис. 3.10, *б*)

$$I_{\mathscr{E}}=(\varphi_1-\varphi_2+\mathscr{E})/r, \qquad (3.38)$$

$(\varphi_1-\varphi_2)$ — разность потенциалов между концами участка, $\mathscr{E}$ — ЭДС источника тока, r — величина, которая называется электрическим сопротивлением проводника (см. ниже).

При расчетах значение ЭДС принимается положительным, если произвольно выбранное направление обхода совпадает с переходом от отрицательного полюса к положительному.

В замкнутой цепи $\varphi_1=\varphi_2$ (рис. 3.12),

$$I=\mathscr{E}/r,$$

r — сопротивление всей цепи, включая внутреннее сопротивление источника тока.

Закон Ома в дифференциальной форме

$$\mathbf{j}=\gamma(\mathbf{E}+\mathbf{E}_{ст}), \qquad (3.39)$$

$\mathbf{j}$ — плотность тока, γ — удельная электропроводность (см. ниже), $\mathbf{E}$ — напряженность электрического поля, $\mathbf{E}_{ст}$ — напряженность поля сторонних сил.

Напряжение

Работа электрических и сторонних сил по перемещению на данном участке носителей заряда, которыми переносится положительный заряд 1 Кл,

$$U=\varphi_1-\varphi_2+\mathscr{E}=Ir. \qquad (3.40)$$

Падение напряжения

Произведение Ir называется *падением напряжения*. Если на участке нет источников тока, то напряжение равно разности потенциалов:

$$U=\varphi_1-\varphi_2.$$

Электрическое сопротивление проводника

Величина, равная разности потенциалов между концами проводника при силе тока 1 А, проходящего по этому проводнику:

$$r=U/I, \qquad (3.41)$$

$\varphi_1-\varphi_2=U$ — разность потенциалов, J — сила тока. Сопротивление однородного проводника постоянного сечения:

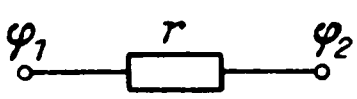


Рис. 3.13

$$r=\rho l/S, \qquad (3.42)$$

ρ — *удельное сопротивление*, равное сопротивлению проводника в форме куба с ребрами длиною 1 м; l — длина, S — площадь нормального поперечного сечения.

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется *удельной проводимостью*:

$$\gamma=1/\rho.$$

Зависимость от температуры

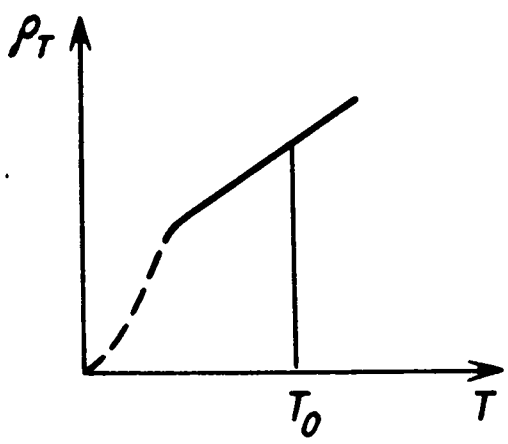


Рис. 3.14

Приблизительно удельное сопротивление проводника линейно зависит от температуры:

$$\rho_T=\rho_0(1+\alpha\Delta T), \qquad (3.43)$$

ρ_T — сопротивление при температуре T, ρ_0 — сопротивление при $T_0=273{,}15\,\text{К}$, $\Delta T=T-T_0$, α — температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha=(\rho_T-\rho_0)/(\rho_0\Delta T).$$

Соединение резисторов

При последовательном соединении резисторов 1, 2, ..., n, имеющих сопротивления r_1, r_2, ..., r_n, общее

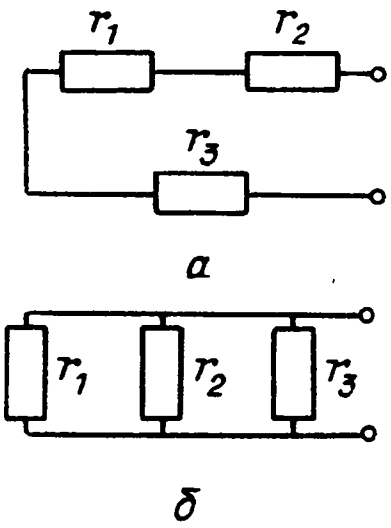


Рис. 3.15

сопротивление

$$r_{\text{пос}} = r_1 + r_2 + \ldots r_n. \qquad (3.44)$$

При параллельном соединении резисторов

$$r_{\text{пар}}^{-1} = r_1^{-1} + r_2^{-1} + \ldots + r_n^{-1}. \qquad (3.45)$$

Работа постоянного тока

$$A = IUt = I^2 rt = U^2 t/r, \qquad (3.46)$$

I — сила тока в цепи, U — напряжение на участке цепи, r — сопротивление, t — время.

Мощность постоянного тока

Работа тока за время 1 с

$$P = IU. \qquad (3.47)$$

Правила Кирхгофа

Используются при расчете токов и напряжений в разветвленных цепях.

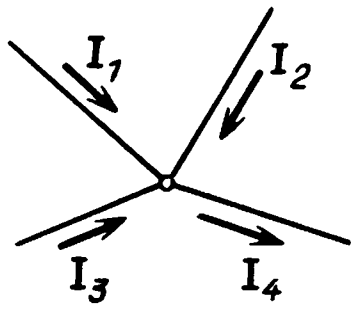


Рис. 3.16

Точка, в которой соединено не менее трех проводников, называется *узлом*.

Первое правило: алгебраическая сумма сил токов на участках цепи, сходящихся в любой точке разветвления, равна нулю. Например, на рис. 3.16 $I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0$.

Токи, входящие в узел, считаются положительными, токи, выходящие из узла, — отрицательными.

Второе правило: для любого замкнутого контура, выделенного из разветвленной цепи, алгебраическая сумма произведений токов на соответствующие сопротивления равна алгебраической сумме всех электродвижущих сил в этом контуре.

При составлении указанной суммы положительными считаются те токи, направления которых совпадают с условно выбранным направлением обхода контура. Положительными считаются те ЭДС, кото-

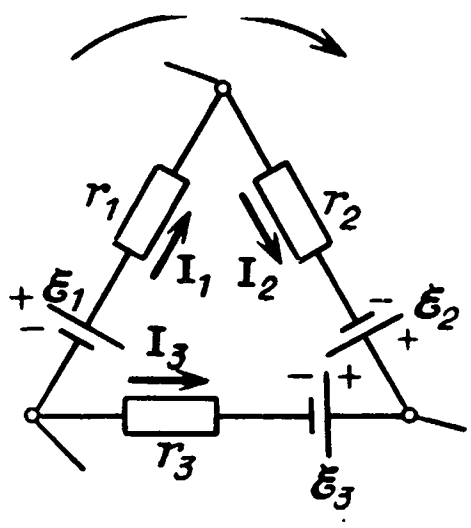


Рис. 3.17

рые повышают потенциал в направлении обхода (т. е. направление обхода совпадает с переходом от отрицательного полюса источника к положительному).
Например (см. рис. 3.17):

$$I_1 r_1 + I_2 r_2 - I_3 r_3 = \mathscr{E}_1 + \mathscr{E}_2 - \mathscr{E}_3.$$

Соединение источников тока

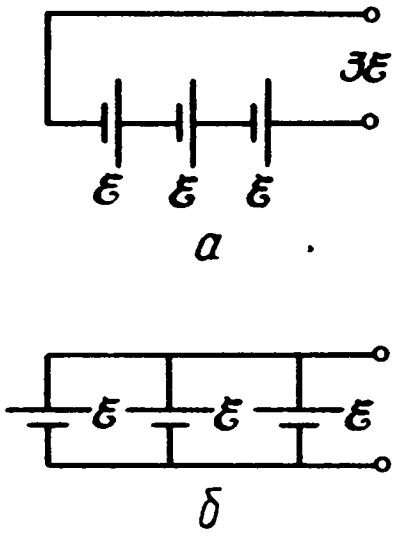


Рис. 3.18

При последовательном соединении n одинаковых источников тока (рис. 3.18, *а*)

$$I(nr_i + r) = n\mathscr{E}_i, \qquad (3.48)$$

n — число источников, r_i — внутреннее сопротивление одного источника, r — внешнее сопротивление цепи, $\mathscr{E}_i$ — ЭДС одного источника.
При параллельном соединении n одинаковых источников тока (рис. 3.18, *б*)

$$I(r + r_i/n) = \mathscr{E}_i. \qquad (3.49)$$

Зарядка и разрядка конденсатора

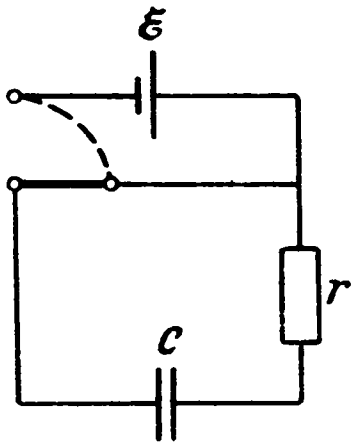


Рис. 3.19

При зарядке конденсатора емкостью C через резистор сопротивлением r изменение силы тока рассчитывается по формуле

$$I = I_0 e^{-t/(rC)}, \qquad (3.50)$$

$\mathscr{E}$ — ЭДС источника тока, $I_0 = \mathscr{E}/r$ — сила тока в момент времени $t = 0$ (в начале разрядки).
При разрядке конденсатора через резистор изменение напряжения определяется по формуле:

$$U = U_0 e^{-t/(rC)}, \qquad (3.51)$$

U_0 напряжение на конденсаторе в момент времени $t = 0$ (в начале разрядки)

Единицы:

электрический ток — ампер, А;
плотность тока — ампер на квадратный метр, А/м^2;
электродвижущая сила, напряжение, разность потенциалов — вольт, В;
сопротивление — ом, Ом;

удельное сопротивление — ом-метр, Ом · м;
проводимость — сименс, См;
удельная проводимость — сименс на метр, См/м.

5. Электрический ток в электролитах

Электролиты

Электролитами (или проводниками второго рода) называются растворы кислот, щелочей и солей в воде или других растворителях, а также расплавленные соли. В электролитах носителями зарядов являются ионы, которые представляют собой части молекул, имеющие положительные и отрицательные заряды.

Плотность тока

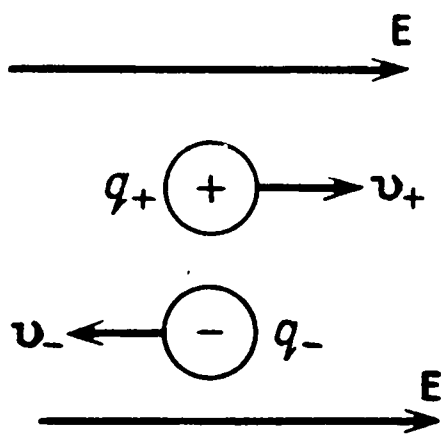


Рис. 3.20

Определяется упорядоченным движением ионов в электрическом поле, которое образуется между электродами, погруженными в электролит и подключенными к источнику тока. Плотность тока в электролите

$$\mathbf{j} = n_+ q_+ \langle \mathbf{v}_+ \rangle + n_- q_- \langle \mathbf{v}_- \rangle, \qquad (3.52)$$

n_+, $\langle \mathbf{v}_+ \rangle$ — концентрация и средняя скорость упорядоченного движения ионов, несущих положительный заряд; n_-, $\langle \mathbf{v}_- \rangle$ — концентрация и средняя скорость ионов, имеющих отрицательный заряд.

Подвижность ионов

Отношение скорости упорядоченного движения ионов к напряженности электрического поля

$$u_+ = \langle v_+ \rangle / E, \quad u_- = \langle v_- \rangle / E. \qquad (3.53)$$

Электролиз. Законы Фарадея

Когда через электролит пропускается ток, на электродах выделя-

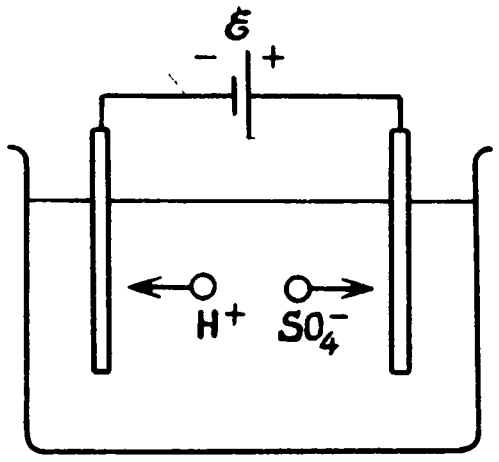


Рис. 3.21

ются вещества. Это явление называется *электролизом*.

Масса вещества, выделившегося на электроде при электролизе, прямо пропорциональна заряду, проходящему через электролит (*первый закон Фарадея*):

$$m = kQ. \tag{3.54}$$

Коэффициент пропорциональности k, равный отношению массы вещества, выделившегося на электроде, к заряду, который был перенесен через электролит ионами, называется *электрохимическим эквивалентом данного вещества*. Электрохимический эквивалент вещества пропорционален его *химическому эквиваленту* (*второй закон Фарадея*):

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{\mu}{n}, \tag{3.55}$$

$F = 96485$ кулон на моль.

Химический эквивалент — внесистемная единица массы, равная отношению молярной массы μ данного вещества к его валентности n; F называется постоянной Фарадея.

Гальванические элементы и аккумуляторы

При погружении в электролит двух электродов между ними устанавливается разность потенциалов. Это явление используется в гальванических элементах, которые являются источниками тока (см. таблицу на стр. 199).

Аккумуляторы являются гальваническими элементами, в которых электроды изготовлены из таких материалов, что они восстанавливают свои первоначальные свойства при пропускании тока (зарядке)

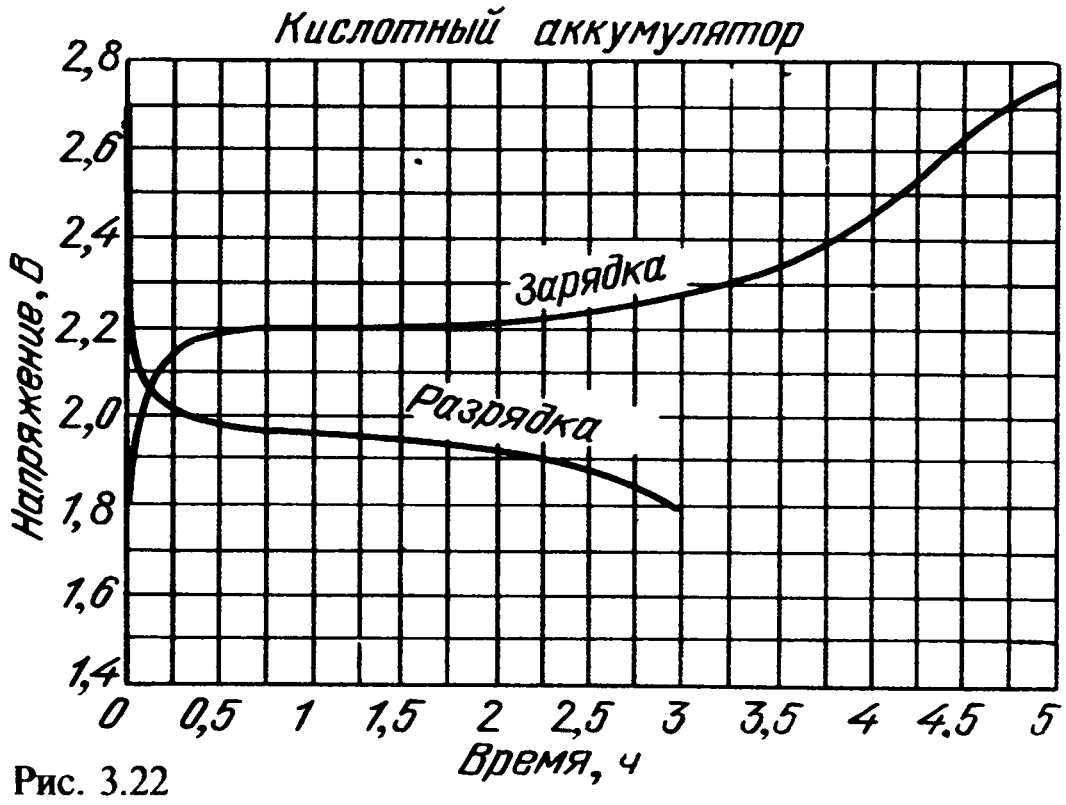


Рис. 3.22

в обратном направлении по сравнению с током при разрядке. Количество электричества, которое может быть получено от аккумулятора при данных условиях работы (температуре, разрядном токе, начальном напряжении), называется *зарядом аккумулятора*; заряд аккумулятора выражается в кулонах. На рис. 3.22 приводятся кривые зарядки (током $Q/4A$) и разрядки (током $Q/3A$) одной банки кислотного аккумулятора ($Q = Q'/3600$, Q' — заряд одной банки, в кулонах).

Топливные элементы

В топливных элементах (рис. 3.23) используются химические реакции окисления и восстановления. В качестве восстановителя чаще всего используется водород, окислителя — кислород или воздух. В таких элементах непрерывно подается топливо, а также отводятся продукты реакции.

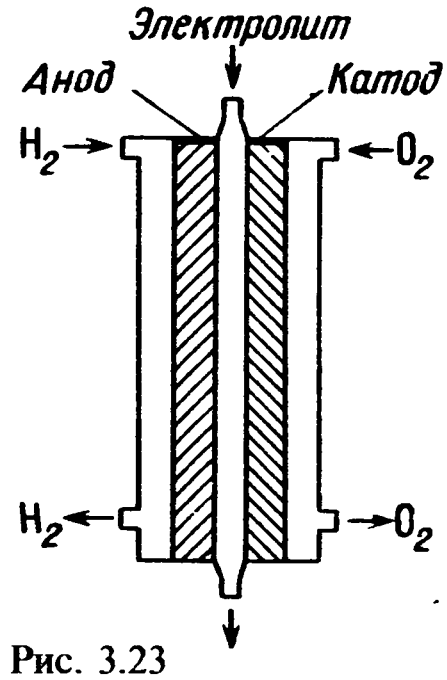


Рис. 3.23

6. Электропроводность газов и плазмы

Ионизация газов

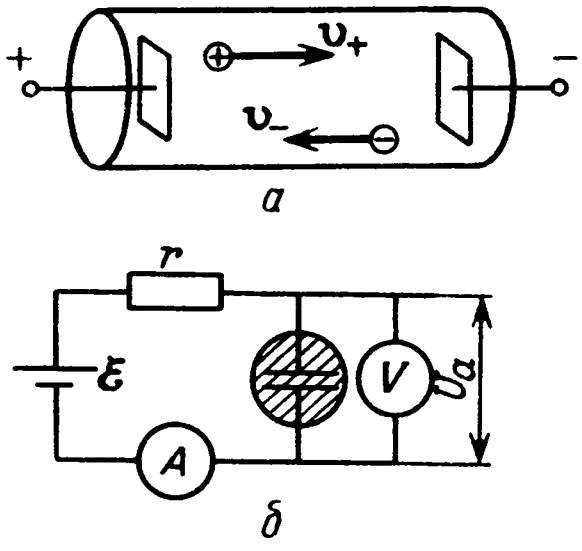


Рис. 3.24, *а, б*

Газы становятся проводниками электрического тока при наличии в них ионов и свободных электронов, т. е. газ должен быть ионизирован (рис. 3.24, *а*).

Энергия, необходимая для отрыва электрона от атома, называется *работой ионизации.*

Электроны обычно присоединяются к нейтральным атомам, образуя отрицательные ионы

Плотность тока

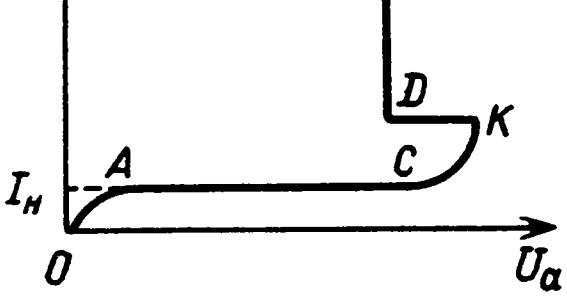


Рис. 3.24, *в*

$$\mathbf{j} = n_+ \mathbf{v}_+ q_+ + n_- \mathbf{v}_- q_-, \qquad (3.56)$$

n_+, n_- — концентрации положительных и отрицательных ионов, $\mathbf{v}_+$, $\mathbf{v}_-$ — средние скорости их упорядоченного движения. Схема для снятия вольтамперной характеристики проводимости газов приведена на рис. 3.24, *б*; вольтамперная характеристика приводится на рис. 3.24, *в*.

Несамостоятельная проводимость

На участке *OA* ток обусловлен ионизацией газа ионизаторами различного рода (например, рентгеновскими лучами или радиоактивным излучением и др.).

На участке *AC* устанавливается ток насыщения $I_н$. На участке *CK* ионизация происходит за счет соударений электронов с атомами. Участки *OABCK* относятся к несамостоятельному разряду — *несамостоятельная проводимость.*

Самостоятельная проводимость

При напряжении U_K происходит пробой, напряжение на электродах

скачкообразно уменьшается (точка D). Этот вид проводимости называется *самостоятельным* (или *тлеющим разрядом*). При увеличении ЭДС источника напряжение на трубке не изменяется до точки E, но сила тока увеличивается. Участок DE соответствует области нормального тлеющего разряда. На участке EF происходит увеличение тока при увеличении напряжения (в этом случае увеличение напряжения источника не полностью компенсируется падением напряжения на резисторе сопротивлением r); этот участок соответствует аномальному тлеющему разряду.

В точке F происходит скачкообразный переход в стадию *дугового разряда* (точка M).

Термоэлектронная эмиссия

Выход электронов из металла под действием теплового движения. Типичная вольтамперная характеристика тока термоэлектронной эмиссии приведена на рис. 3.25.

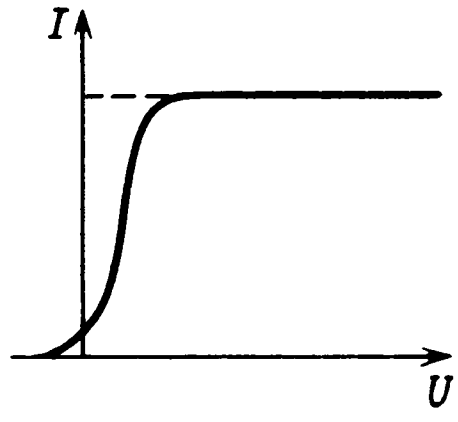


Рис. 3.25

Наибольшее значение тока термоэлектронной эмиссии называется *током насыщения*, плотность которого можно рассчитать по формуле

$$j_{\text{н}} = BT^2 e^{-A/(kT)}, \qquad (3.57)$$

B — постоянная, A — работа выхода, T — температура.

По теоретическим расчетам для чистых металлов $B = 1{,}2 \cdot 10^6$ А/(м$^2 \cdot$К^2), однако на опыте получаются различные значения.

Электропроводность плазмы

Электропроводность плазмы в основном определяется подвижностью электронов (о плазме см. гл. II, п. 12).

Плотность тока электронной проводимости

$$j_{\text{e}} = en_{\text{e}} v_{\text{e}}, \qquad (3.58)$$

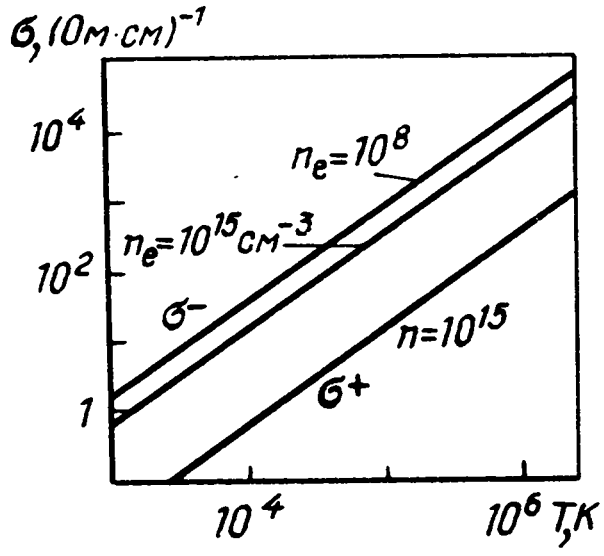


Рис. 3.26

n_e — концентрация электронов, v_e — скорость упорядоченного движения электронов.

Ионная проводимость плазмы значительно меньше электронной проводимости.

Удельная электронная проводимость

$$\sigma_e \simeq e^2 n_e D_e/(kT), \qquad (3.59)$$

D_e — коэффициент диффузии электронов (см. гл. II); σ_e слабо зависит от концентрации (рис. 3.26). При температуре выше 10^7 К проводимость водородной плазмы больше проводимости серебра при температуре около 20 °С.

7. Электропроводность полупроводников

Полупроводники

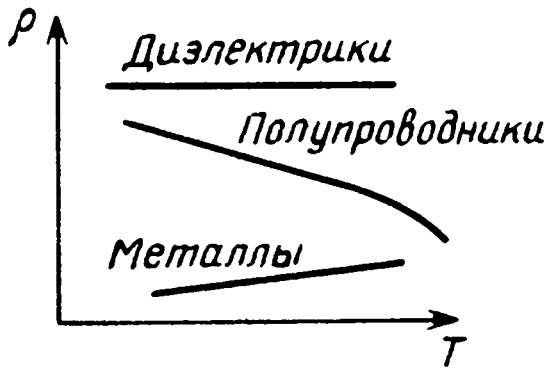


Рис. 3.27

Вещества, у которых удельное сопротивление ρ при комнатных температурах находится в пределах $10^{-4} \div 10^{-7}$ Ом·м. В отличие от металлов удельное сопротивление у полупроводников уменьшается с повышением температуры.

Зоны энергетических уровней

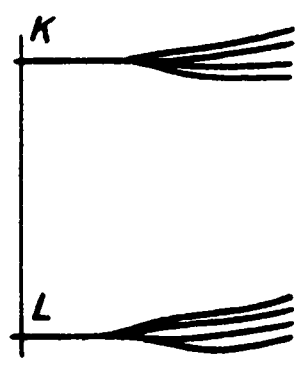


Рис. 3.28

При взаимодействии атомов энергетические уровни электронов незначительно изменяются по сравнению с энергетическими уровнями электронов невзаимодействующих атомов; вследствие взаимодействия N атомов образуется N близко расположенных энергетических уровней (рис. 3.28). Совокупность расщепленных энергетических уровней образует зону *разрешенных* значений энергии. Зоны отделяются друг от друга интервалами неразрешенных значений энергии; такие интервалы энергии называются *запрещенными зонами.*

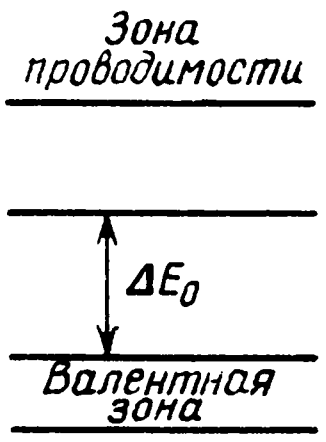


Рис. 3.29

При 0 К валентные электроны занимают низшие энергетические уровни. Все разрешенные уровни в этой зоне являются занятыми. Эта зона является заполненной, или *валентной зоной*. Во второй зоне дозволенных уровней энергии при 0 К нет ни одного электрона; эта зона называется *зоной проводимости*. Энергия ΔE_0 (рис. 3.29), необходимая для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости, называется *шириной запрещенной зоны*. У металлов зона проводимости и валентная зона перекрываются; у диэлектриков $\Delta E_0 > 2$ эВ.

Электропроводность обусловлена наличием электронов в зоне проводимости; если нет электронов в зоне проводимости, нет и электропроводности.

Тепловое движение, а также различные внешние воздействия (например, свет, электрическое поле) обуславливают переход части электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Электронная и дырочная проводимость

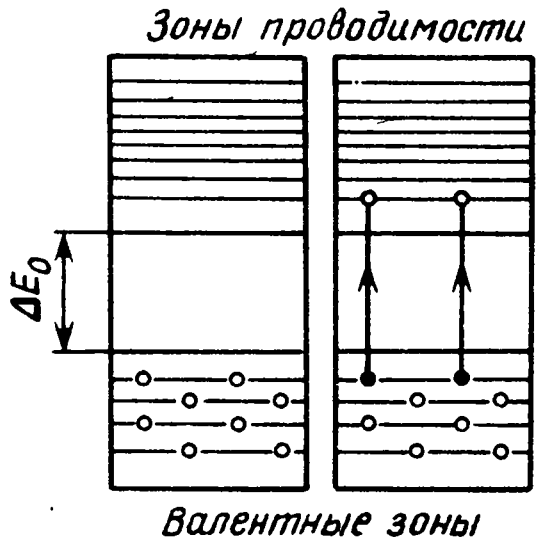


Рис 3.30

После перехода электрона в зону проводимости в валентной зоне остаются вакантные уровни. При наличии внешнего электрического поля будут перемещаться электроны в обеих зонах. Проводимость, обусловленная перемещением электронов в зоне проводимости, называется *электронной проводимостью*; проводимость, обусловленная движением электронов в валентной зоне, называется *дырочной проводимостью*. Перемещение электрона в заполненной зоне можно рассматривать как перемещение положи-

тельного заряда в направлении, противоположном движению электрона. Такой положительный заряд условно называется *дыркой*. Проводимость, обусловленная движением одинакового количества электронов и дырок, которые образуются в результате перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости, называется *собственной*.

Полупроводник с электронной проводимостью называется *полупроводником n-типа*; полупроводник с дырочной проводимостью называется *полупроводником p-типа*.

Примесная проводимость

При практическом применении полупроводников наибольшее значение имеет *примесная проводимость*, которая определяется примесями других веществ. Примеси бывают двух видов — донорные и акцепторные. *Донорные примеси* создают дополнительные разрешенные уровни энергии вблизи верхней границы запрещенной зоны; атомы таких примесей отдают электроны в зону проводимости и, таким образом, обеспечивают примесную электронную проводимость. *Акцепторные примеси* создают дополнительные уровни вблизи нижней границы запрещенной зоны; атомы акцепторных примесей принимают на свои уровни электроны из валентной зоны и тем самым обеспечивают примесную дырочную проводимость.

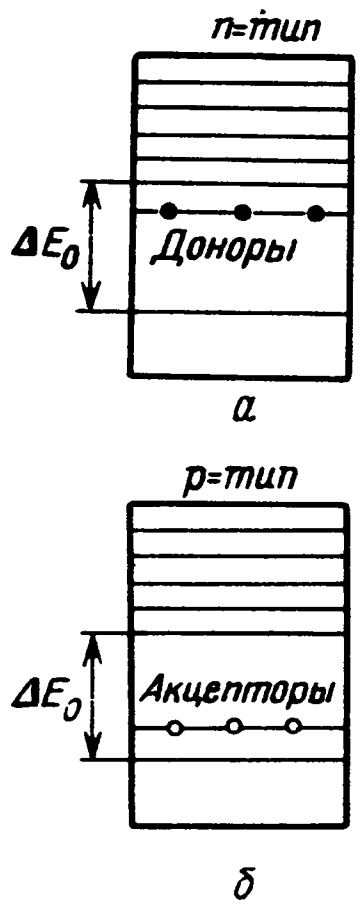


Рис. 3.31

В германии примеси элементов V группы Периодической системы (например, сурьмы) являются донорными, а примеси элементов III группы (например, галлия)

акцепторными. Возможна примесная проводимость, когда в полупроводник введены акцепторные и донорные примеси. Во всех полупроводниках всегда имеются электроны и дырки, но вклад их в электропроводность может быть неодинаковым за счет различных концентраций или подвижностей.

8. Взаимодействие движущихся заряженных частиц. Магнитное поле

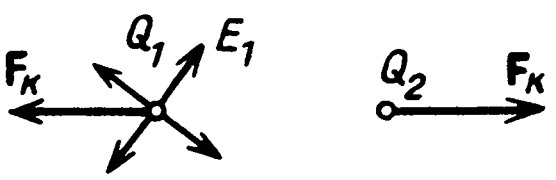


Рис. 3.32

1. Если две заряженные частицы (точечные заряды) неподвижны относительно инерциальной системы отсчета, то сила взаимодействия между ними (кулоновская сила) рассчитывается по закону Кулона (см. п. 1 гл. III):

$$F_к = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}. \qquad (3.60)$$

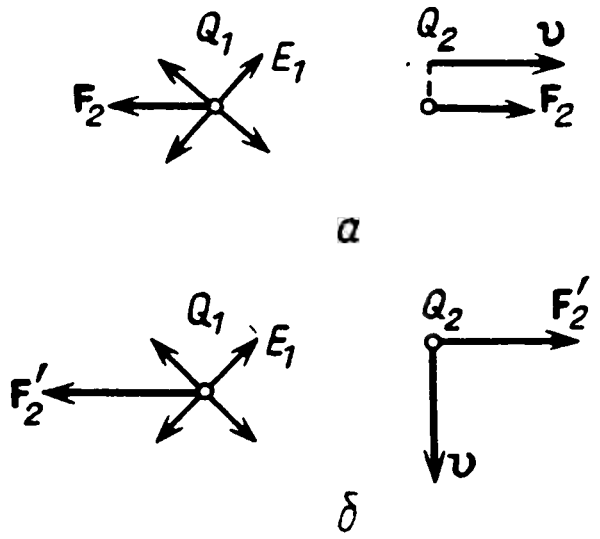


Рис. 3.33

2. Если частица, имеющая заряд Q_1, неподвижна, а другая частица с зарядом Q_2 движется со скоростью v вдоль одной из линий напряженности электрического поля заряда Q_1, то сила взаимодействия F_2 уменьшается:

$$F_2 = F_к(1-\beta^2), \quad \beta = v/c, \qquad (3.61)$$

c — скорость света в вакууме; при движении перпендикулярно линии напряженности сила взаимодействия F'_2 увеличивается:

$$F'_2 = F_к/\sqrt{1-\beta^2}. \qquad (3.62)$$

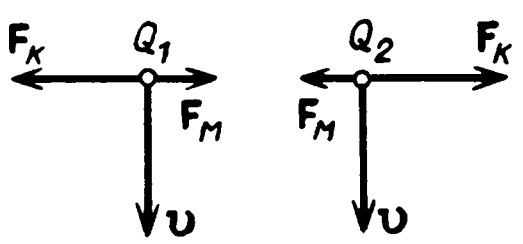


Рис. 3.34

3. Если обе заряженные частицы Q_1 и Q_2 движутся в одном направлении с одинаковыми скоростями параллельно друг другу, то сила взаимодействия F_3 уменьшается по

сравнению с кулоновской силой:

$$F_3 = F_к(1-\beta^2). \qquad (3.63)$$

Магнитные силы

Добавочная составляющая силы F_3, равная

$$F_м = \beta^2 F_к, \qquad (3.64)$$

называется магнитной силой.

Магнитное поле

Поле магнитных сил называется *магнитным полем*. Магнитное поле является добавочным электрическим полем, источником которого являются движущиеся заряды. Посредством магнитного поля осуществляется взаимодействие проводников с токами, проводников с токами и магнитами, а также взаимодействие между магнитами. Характеристикой магнитного поля является магнитная индукция.

Сила Лоренца

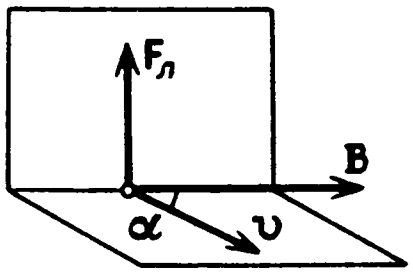


Рис. 3.35

На движущуюся в магнитном поле частицу с зарядом Q действует сила, которая называется силой Лоренца (рис. 3.35):

$$F_л = Q[\mathbf{v}\,\mathbf{B}], \quad F = QvB\sin\alpha, \qquad (3.65)$$

$\mathbf{v}$ — скорость частицы, $\mathbf{B}$ — магнитная индукция, α — угол между векторами $\mathbf{v}$ и $\mathbf{B}$. Если $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$, то сила Лоренца имеет максимальное значение: $F_{лм} = QvB$; если $\mathbf{v} \parallel \mathbf{B}$, то сила Лоренца равна нулю. Модуль вектора магнитной индукции

$$B = \frac{F_{лм}}{Qv}. \qquad (3.66)$$

Закон Ампера

Действующая на проводник с током в магнитном поле сила равна векторной сумме сил Лоренца, действующих на каждый носитель заряда; такая сила называется *силой Ампера*. Сила Ампера $\Delta\mathbf{F}$, действу-

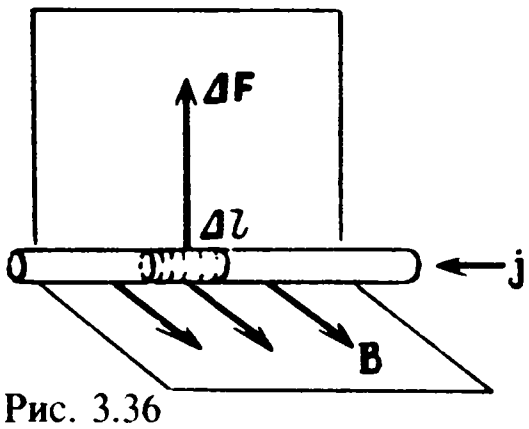


Рис. 3.36

ющая на элементарный отрезок Δl тонкого проводника, определяется соотношением (закон Ампера) (рис. 3.36)

$$\Delta \mathbf{F} = I[\Delta \mathbf{l}\, \mathbf{B}], \quad \Delta F = I \Delta l\, B \sin\alpha, \tag{3.67}$$

I — сила тока, $\mathbf{B}$ — магнитная индукция, α — угол между векторами $\Delta \mathbf{l}$ и $\mathbf{B}$; направление вектора $\Delta \mathbf{l}$ совпадает с направлением вектора плотности тока $\mathbf{j}$; векторная величина $I\Delta \mathbf{l}$ называется элементом тока. Если $\Delta \mathbf{l} \perp \mathbf{B}$, то сила Ампера имеет максимальное значение:

$$\Delta F_{\text{м}} = IB\Delta l. \tag{3.68}$$

Контур с током в магнитном поле. Магнитный момент

Рис. 3.37

На плоский контур тока малых размеров (рис. 3.37), помещенный в однородное магнитное поле, действует механический момент сил M (см. гл. I)

$$\mathbf{M} = IS[\mathbf{n}\,\mathbf{B}], \quad M = ISB\sin\alpha, \tag{3.69}$$

I — сила тока, S — площадь контура, $\mathbf{B}$ — магнитная индукция, α — угол между нормалью к плоскости контура и вектором $\mathbf{B}$, $\mathbf{n}$ — единичный вектор нормали.
Векторная величина

$$\mathbf{p}_{\text{м}} = IS\mathbf{n} \tag{3.70}$$

называется *магнитным моментом контура*; модуль магнитного момента $p_{\text{м}} = IS$. Направление магнитного момента определяется по правилу правого винта: если винт вращать по направлению тока в контуре, то поступательное перемещение будет совпадать с направлением $\mathbf{p}_{\text{м}}$ и единичным вектором нормали $\mathbf{n}$ (рис. 3.38). Если $\mathbf{n} \perp \mathbf{B}$, то момент сил имеет максимальное значение

Рис. 3.38

$$M_{\text{м}} = ISB. \tag{3.71}$$

Различные варианты определения магнитной индукции приводятся ниже.

Магнитная индукция

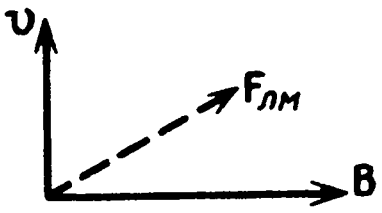


Рис. 3.39

а) Вектор. модуль которого равен максимальной силе, действующей на движущийся со скоростью 1 м/с точечный положительный заряд 1 Кл: $B=F_{лм}/(Qv)$.
Направление **B** определяется векторным произведением $[\mathbf{F}_{лм}\mathbf{v}]$ или по правилу левой руки (рис. 3.39).

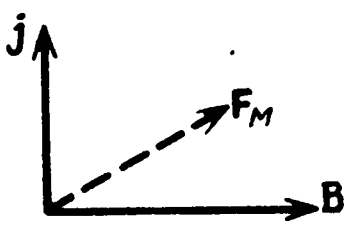


Рис. 3.40

б) Вектор, модуль которого равен максимальной силе, действующей на единичный элемент тока: $B=F_м/(I\Delta l)$.
Направление **B** определяется векторным произведением $[\mathbf{F}_м\mathbf{j}]$ или по правилу левой руки (рис. 3.40).
в) Вектор, модуль которого равен максимальному механическому моменту, действующему на плоский контур тока с единичным магнитным моментом: $B=M_м/(IS)$.
Направление **B** определяется векторным произведением $[\mathbf{M}_м\mathbf{n}]$; направление **n** определяется по правилу правого винта (см. введение) (рис. 3.41).

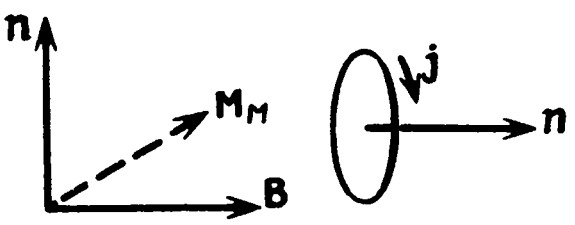


Рис. 3.41

Примечание. Векторы, изображенные штриховыми линиями, направлены за плоскость чертежа.

Закон Био — Савара — Лапласа

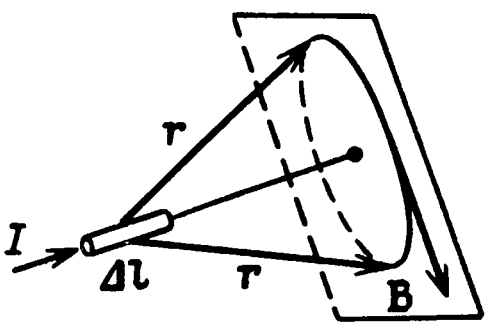


Рис. 3.42

Линейным элементом тока во внешнем пространстве создается магнитное поле, магнитная индукция которого (рис. 3.42)

$$\Delta\mathbf{B}=\frac{\mu_0\mu I[\Delta\mathbf{l}\,\mathbf{r}]}{4\pi r^3}. \qquad (3.72)$$

Напряженность магнитного поля

Векторная величина

$$\mathbf{H}=\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \qquad (3.73)$$

называется *напряженностью магнитного поля* в вакууме. Напряженность магнитного поля в среде

$$\mathbf{H}_c = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0 \mu}, \qquad (3.73, a)$$

μ — относительная магнитная проницаемость среды (см. п. 13 гл. III).

Взаимодействие двух параллельных проводников с токами

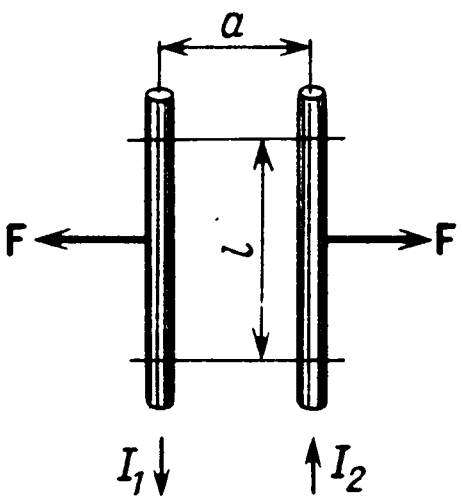


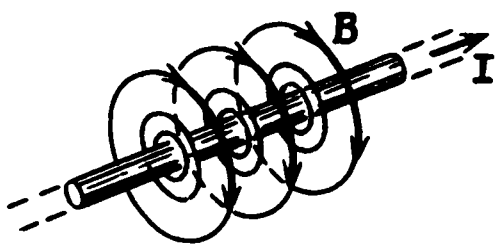
Рис. 3.43

Обусловлено магнитными силами, которые действуют между движущимися носителями зарядов в проводниках; кулоновское взаимодействие в этом случае равно нулю, так как проводники электрически нейтральны (взаимодействие между носителями зарядов на поверхности проводника не учитывается). Два длинных прямолинейных и параллельных проводника притягиваются друг к другу, если токи имеют одинаковое направление; если токи имеют противоположные направления, то проводники отталкиваются. Модуль магнитной силы (рис. 3.43):

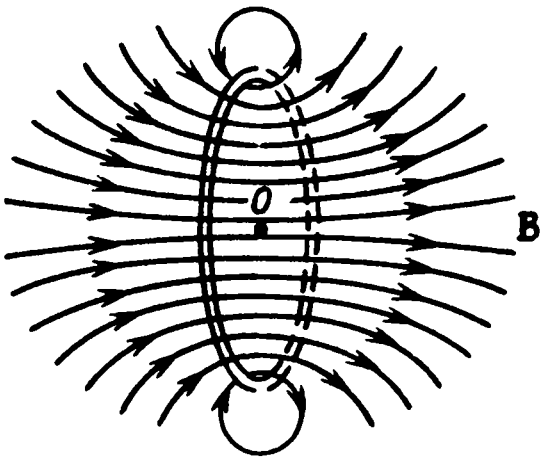
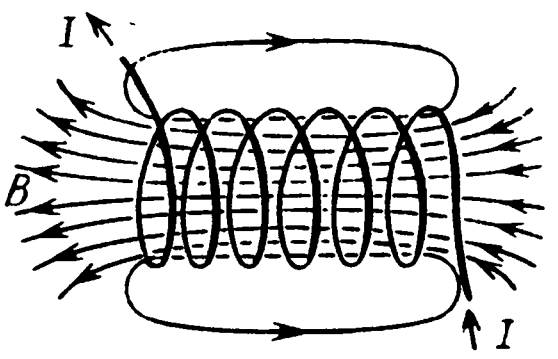
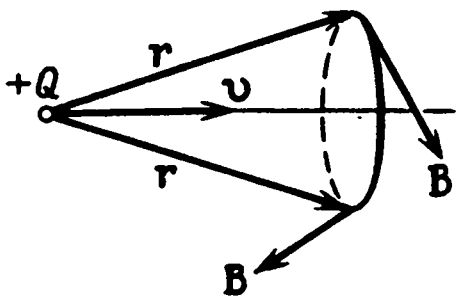
$$F = \frac{\mu \mu_0 I_1 I_2 l}{2 \pi a}, \qquad (3.74)$$

a — расстояние между параллельными проводами, I_1 и I_2 — силы тока в них, l — их длина, μ_0 — магнитная постоянная; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ генри на метр; μ — относительная магнитная проницаемость среды (см. п. 13 гл. III).

9. Магнитные поля токов различной конфигурации

Проводники с током	Линии магнитной индукции B	Формулы
Прямой длинный провод с круглым сечением радиуса R		$B_{вп} = \mu_0 \mu I/(2\pi r)$ $(r \geqslant R)$; $B_{вн} = \mu_0 \mu Ir/(2\pi R^2)$ $(r < R)$; (3.75) r — расстояние по нормали от оси проводника

Продолжение

Проводники с током	Линии магнитной индукции B	Формулы
Виток с радиусом окружности R (в центре O)		$B_0 = \mu_0 \mu I/(2R)$ (3.76)
Прямой соленоид длиной l с радиусом витков R $(l \gg R)$ в точках на оси		$B_c = \mu\mu_0 NI/l$, (3.77) N – количество витков
Движущаяся заряженная частица		$\mathbf{B}_Q = \mu\mu_0 Q[\mathbf{vr}]/(4\pi r^3)$, (3.78) Q — заряд частицы, v — ее скорость $(v \ll c)$

10. Электромагнитная индукция

Переменное магнитное поле является источником вихревого электрического поля, которое в проводящем контуре возбуждает электрический ток (индукционный ток). Это явление, открытое Фарадеем, называется *электромагнитной индукцией.*

Магнитный поток

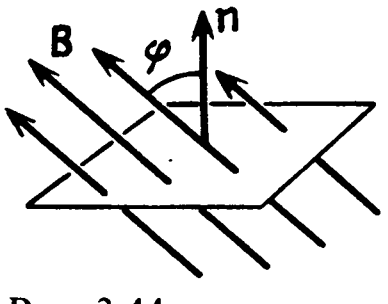


Рис. 3.44

Величина, равная произведению магнитной индукции **B**, площади S поверхности, ограниченной контуром, и косинуса угла между вектором **B** и нормалью **n** к поверхности (рис. 3.44):

$$\Phi = BS\cos\varphi. \quad (3.79)$$

В качестве контура можно рассматривать любую воображаемую линию, которая ограничивает часть поверхности. Если контур заменить проводником (например, тонкой проволочкой), то такой контур будет называться *проводящим*.

Работа сил Ампера в проводящем контуре

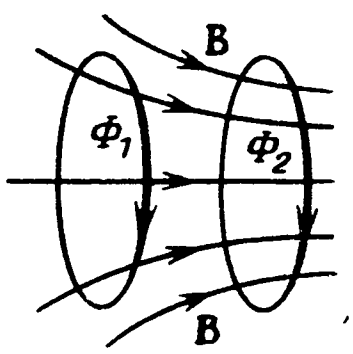


Рис. 3.45

При перемещении во внешнем магнитном поле контура, в котором сила тока поддерживается постоянной, силами Ампера производится работа

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1); \qquad (3.80)$$

Φ_1 — магнитный поток сквозь контур тока в начале перемещения, Φ_2 — магнитный поток в конце перемещения.

Энергия магнитного поля

В пространстве, окружающем проводник с током I, распределена энергия

$$W_м = LI^2/2, \qquad (3.81)$$

L — индуктивность проводника (см. ниже).

Объемная плотность энергии магнитного поля

По определению

$$w = \lim_{\Delta V \to 0} (\Delta W_м / \Delta V) = dW_м / dV,$$

$\Delta W_м$ — энергия магнитного поля в элементарном объеме ΔV, B — индукция магнитного поля. Энергия в единичном объеме

$$w_м = B^2/(2\mu_0\mu). \qquad (3.82)$$

Вихревое электрическое поле и индукционный ток

В замкнутом контуре, ограничивающем площадку, через которую проходит переменный магнитный поток, возбуждается (индуцируется) электрическое поле с замкнутыми линиями напряженности (вихревое электрическое поле). Если кон-

тур будет проводящим, то в нем образуется электрический ток, который называется *индукционным током*.

Электродвижущая сила (ЭДС) индукции

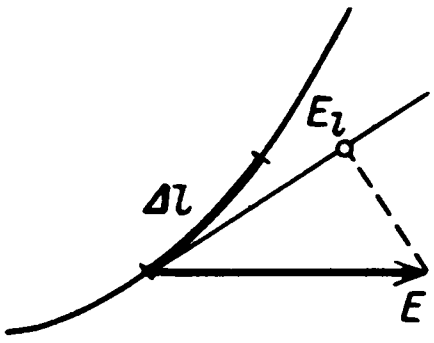


Рис. 3.46

Характеристикой наведенного (индуцированного) поля является электродвижущая сила индукции, равная работе, которую совершают силы вихревого электрического поля по перемещению вдоль контура носителей, суммарный положительный заряд которых равен 1 Кл. Из определения ЭДС индукции следует

$$\mathscr{E} = \Sigma E_l \Delta l_i, \qquad (3.83)$$

$E_l \Delta l_i$ — элементарная работа сил вихревого электрического поля на элементарном участке контура Δl, E_l — проекция вектора напряженности **E** на касательную к контуру в данной точке.

Циркуляция вектора напряженности

Точнее ЭДС индукции определяется соотношением

$$\oint_L E_l dl = \mathscr{E}. \qquad (3.84)$$

Этот интеграл называется циркуляцией вектора **E** по контуру L.

Правило Ленца

Индукционный ток имеет такое направление, что создаваемый им магнитный поток препятствует изменению магнитного потока, возбуждающего индукционный ток; иначе, индукционный ток направлен так, чтобы «противодействовать» причине его возникновения.

Закон Фарадея

ЭДС индукции равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную

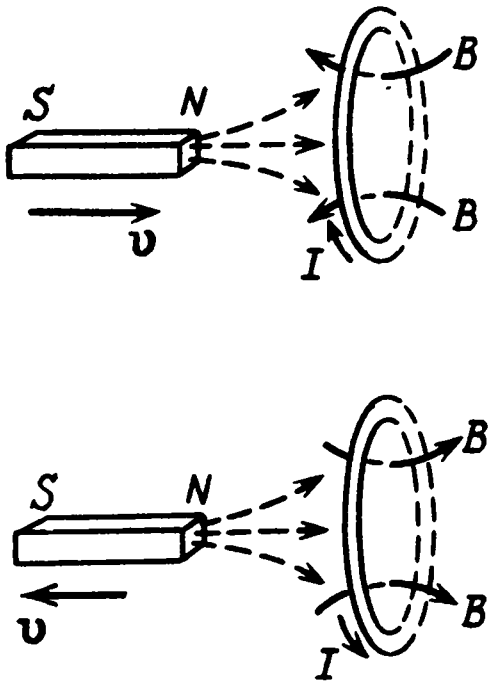


Рис. 3.47

контуром:

$$\mathscr{E} = -\Delta\Phi/\Delta t \qquad (3.85)$$

или

$$\mathscr{E} = -d\Phi/dt.$$

Знаки $\mathscr{E}$ и $d\Phi/dt$ противоположны. Поскольку магнитный поток определяется произведением трех величин: **B**, S и $\cos\varphi$, то и изменение магнитного потока зависит от этих же величин.

Самоиндукция

Рис. 3.48

При изменении тока в проводнике возникает индуцированное (наведенное) поле, которое возбуждается магнитным потоком этого тока. Такое явление называется самоиндукцией. ЭДС самоиндукции контура можно рассчитать по формуле

$$\mathscr{E}_c = -d\Phi_c/dt, \qquad (3.86)$$

Φ_c — магнитный поток, создаваемый током проводящего контура через поверхность, ограниченную этим контуром; такой поток называется *магнитным потоком самоиндукции контура.*

Индуктивность контура

Величина, равная магнитному потоку самоиндукции через поверхность, ограниченную проводящим контуром с током 1 ампер,

$$L = \Phi_c/I. \qquad (3.87)$$

Если относительная магнитная проницаемость постоянна и контур не деформируется, то индуктивность L не зависит от тока; тогда

$$\mathscr{E}_c = -L\,dI/dt, \qquad (3.88)$$

$\mathscr{E}_c$ — ЭДС самоиндукции.

Ток при замыкании и размыкании цепи

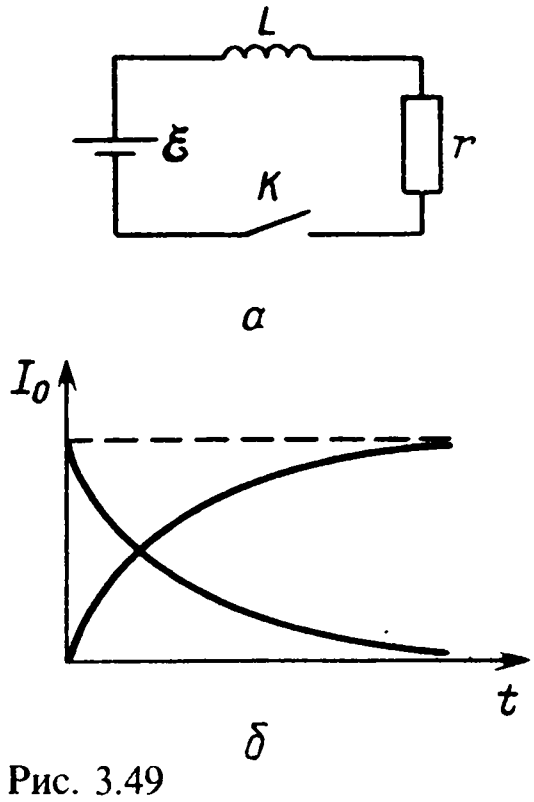


Рис. 3.49

Изменение тока при размыкании цепи с последовательно включенными резистором сопротивлением r и катушкой индуктивностью L рассчитывается по формуле

$$I = I_0 e^{-rt/L}, \qquad (3.89)$$

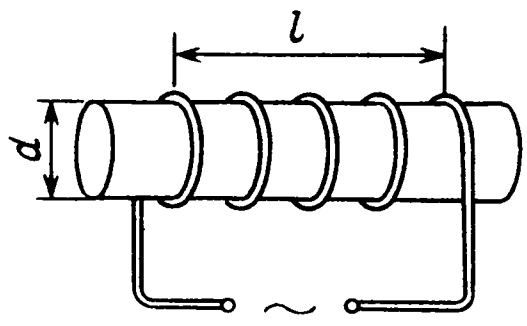
I_0 — сила тока в момент размыкания.

При замыкании цепи сила тока

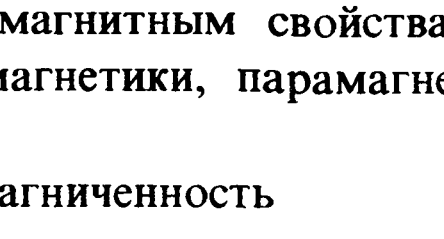
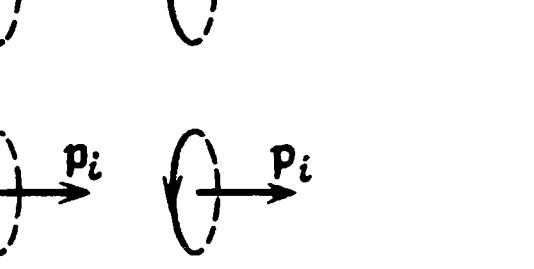
$$I = I_0 \left(1 - e^{-rt/L}\right), \qquad (3.90)$$

I_0 — предельное значение силы тока (при $t \to \infty$).

11. Индуктивности различных проводников

Форма проводника	Индуктивность
Соленоид с сердечником 	$L = k\,\mu_0 \mu\, N^2 S/l, \qquad (3.91)$ N — количество витков, l — длина соленоида, k — коэффициент, зависящий от отношения l/d (d — диаметр катушки); μ — относительная магнитная проницаемость сердечника l/d | 0,1 | 0,5 | 5 | 10 k | 0,2 | 0,5 | 0,6 | 1,0
Одиночный прямой провод круглого сечения и небольшой длины из неферромагнитного материала ($l/r < 10$)	$L_{\text{пр}} = \mu_0 l \left(\ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4}\right)/(2\pi), \qquad (3.92)$ l — длина провода, r — радиус сечения

Продолжение

Форма проводника	Индуктивность
Длинный провод круглого сечения, расположенный на высоте h горизонтально над поверхностью Земли 	$L_г = \mu_0 l \left(\ln \frac{2h}{r} - 1 \right) / (2\pi)$ (3.92а) если $h \gg l$; $L_г = \mu_0 l \ln \frac{2h}{r} / (2\pi)$, (3.92б) если $h \ll l$, l — длина провода.
Двухпроводная линия в воздухе 	$L_{лин} = \mu_0 l \left(\ln \frac{d}{r} + \frac{1}{4} \right) / \pi$, (3.93) d — расстояние между осями проводов, r — радиус провода, l — длина линии.
Коаксиальный кабель	$L_{кк} = \mu\mu_0 l \left(\ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{4} \right) / (2\pi)$, (3.94) d_1 — диаметр внешней проводящей оболочки, d_2 — диаметр проводника, l — длина кабеля, μ — относительная магнитная проницаемость среды между проводником и оболочкой.

12. Намагничение вещества

По магнитным свойствам все вещества разделяются на три вида: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Намагниченность

Рис. 3.50

Векторная величина, равная векторной сумме магнитных моментов в единичном объеме вещества:

$$\mathbf{J} = \left(\sum_i \mathbf{p}_i \right) / (\Delta V) = n \langle \mathbf{p}_м \rangle; \qquad (3.95)$$

n — концентрация молекул, $\langle \mathbf{p}_м \rangle$ — средний магнитный момент одной молекулы.

В изотропной среде

$$\mathbf{J} = \varkappa \mathbf{H}, \tag{3.96}$$

$\varkappa$ - магнитная восприимчивость.

Индукция магнитного поля в веществе

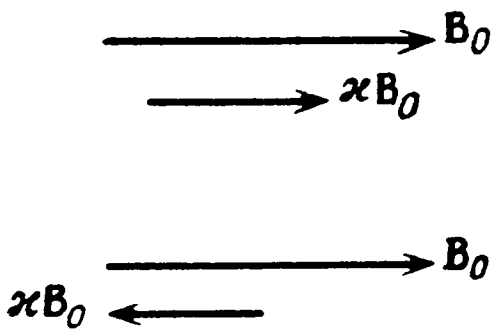


Рис. 3.51

Состоит из двух компонент

$$\mathbf{B}_c = \mathbf{B}_0 + \varkappa \mathbf{B}_0, \tag{3.97}$$

$\mathbf{B}_0$ — индукция внешнего поля в вакууме; $\varkappa \mathbf{B}_0$ — индукция собственного магнитного поля вещества (рис. 3.51):

$$\mathbf{B}_c = (1+\varkappa)\mathbf{B}_0 = \mu \mathbf{B}_0, \tag{3.98}$$

$\mu = 1 + \varkappa$ — относительная магнитная проницаемость среды.

Диамагнетики и парамагнетики

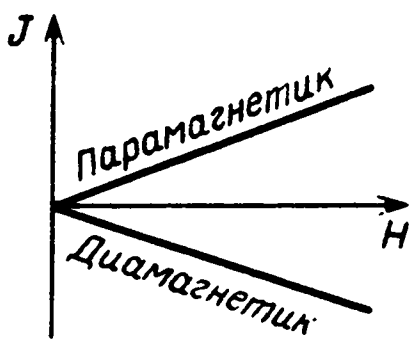


Рис. 3.52

В диамагнетиках (инертные газы, золото, цинк, серебро, медь, вода и т. д.) вектор магнитной индукции собственного магнитного поля направлен противоположно вектору магнитной индукции внешнего поля, относительная магнитная проницаемость $\mu \leqslant 1$. В парамагнетиках (азот, воздух, алюминий, платина и др.) вектор индукции собственного магнитного поля имеет одинаковое направление с вектором магнитной индукции намагничивающего поля, относительная магнитная проницаемость $\mu \geqslant 1$.

Зависимость J от H (кривая намагничения) для парамагнетиков и диамагнетиков является линейной.

Магнитная восприимчивость диамагнетиков (и некоторых парамагнетиков, например, в щелочных металлах) не зависит от температуры. Магнитная восприимчивость парамагнетиков (за немногими исключениями) изменяется обратно пропорционально температуре T.

Ферромагнетики

В ферромагнетиках (железо, никель, кобальт, некоторые сплавы) магнитная проницаемость $\mu >> 1$; она в значительной мере зависит от напряженности магнитного поля H. Зависимость B или J от H (при условии, что ферромагнетик в начальном состоянии был размагничен) называется основной кривой намагничения (или начальной кривой намагничения).

Кривые намагничения

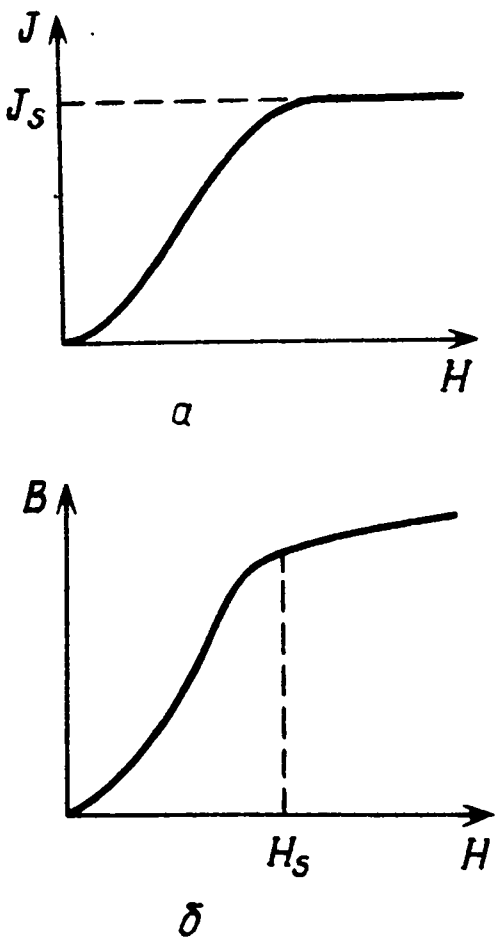


Рис. 3.53

На рис. 3.53 показаны основные кривые намагничения на диаграмме $J-H$ и $B-H$. Намагниченность J увеличивается с увеличением напряженности магнитного поля H, но уже при небольших значениях $H=H_s$ достигается насыщение, т. е. при дальнейшем увеличении $H>H_s$ намагниченность имеет постоянное значение J_s, однако при этом магнитная индукция продолжает увеличиваться по линейному закону: $B=\mu_0 H+\mu_0 J_s$. Магнитная проницаемость ферромагнетиков растет с увеличением температуры. При некоторой температуре $T_К$ ферромагнетик превращается в парамагнетик; эта температура называется *температурой* (*точкой*) *Кюри*. При температурах выше точки Кюри вещество является парамагнетиком.

Петля гистерезиса

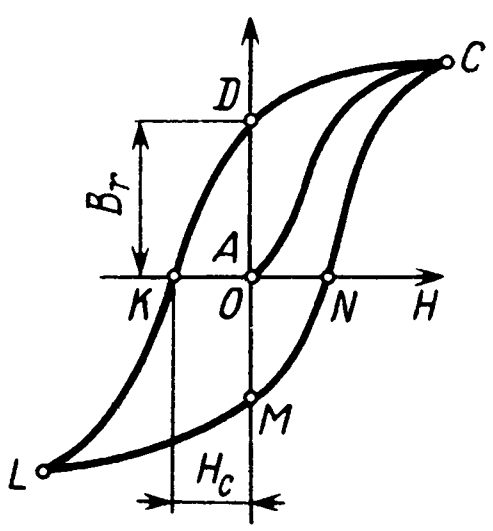


Рис. 3.54

Магнитная индукция, сохраняющаяся в ферромагнетике после того, как напряженность внешнего поля становится равной нулю, называется остаточной магнитной индукцией B_r. На рис. 3.54 остаточная индукция B_r равна отрезку AD. Чтобы размагнитить ферромагнетик, необходимо изменить на противоположное направление **H**. Изменение магнитной индукции в этом случае определяется кри-

вой KL. Напряженность магнитного поля. H_c (отрезок AK на рис. 3.54), при которой магнитная индукция равна нулю, называется *коэрцитивной напряженностью* (или *коэрцитивной силой*).

Зависимость B (или J) при изменении напряженности магнитного поля от значения $+H$ до $-H$ выражается замкнутой кривой $CDKLMNC$. Такая кривая называется кривой гистерезиса.

Магнитострикция

Ферромагнетик, помещенный в магнитное поле, изменяет свои линейные размеры, т. е. деформируется. Это явление называется *магнитострикцией*. Относительное удлинение зависит от природы ферромагнетика и напряженности магнитного поля.

13. Основные уравнения электродинамики

Ток смещения

Переменное электрическое поле (например, между обкладками конденсатора) возбуждает переменное магнитное поле; это магнитное поле эквивалентно магнитному полю, которое возбуждается переменным током проводимости, плотность которого

$$j=\Delta D/\Delta t=\varepsilon_0\Delta E/\Delta t+\Delta P/\Delta t \quad (3.99)$$

D — электрическое смещение, P — поляризованность (см. (3.9)). Этот ток называется *током смещения*. Плотность тока смещения состоит из двух частей: плотности истинного тока смещения $\varepsilon_0\Delta E/\Delta t$ и плотности тока поляризации $\Delta P/\Delta t$. Плотность полного тока равна сумме плотностей токов проводимости и смещения:

$$\mathbf{j}=\mathbf{j}_{\text{пр}}+\mathbf{j}_{\text{см}}. \quad (3.100)$$

Первое уравнение Максвелла

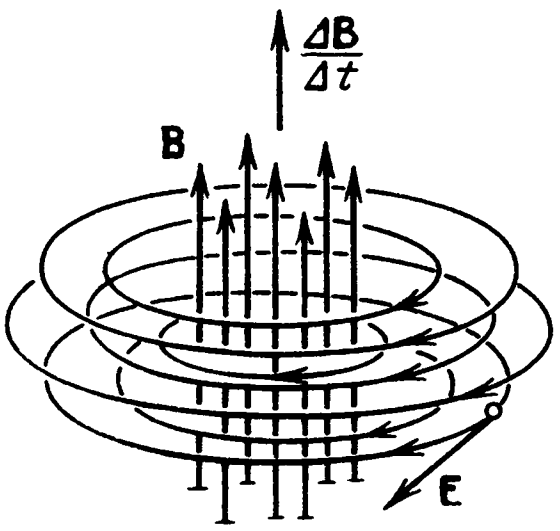


Рис. 3.55

Является обобщением закона электромагнитной индукции:

$$\oint_L E_l\,dl = -\partial\Phi/\partial t \qquad (3.101)$$

(см. (3.84) и (3.86)).

Качественно это уравнение можно сформулировать следующим образом: переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

Второе уравнение Максвелла

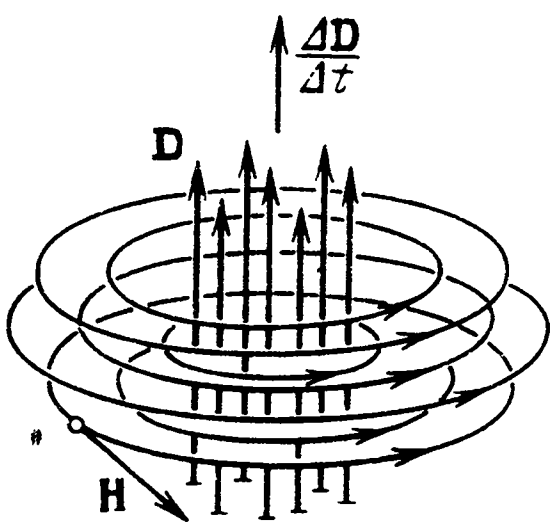


Рис. 3.56

Является обобщением закона Био — Савара — Лапласа (см. гл. III, п. 11):

$$\oint_L H_l\,dl = I_{\text{пр}} + I_{\text{см}}. \qquad (3.102)$$

H_l — проекции вектора **H** на касательную к контуру L в данной точке, dl — элемент контура, $I_{\text{пр}}$, $I_{\text{см}}$ — силы токов проводимости и смещения, которые охватываются контуром L.

Второе уравнение качественно можно сформулировать так: магнитное поле порождается как токами проводимости, так и токами смещения, т. е. переменным электрическим полем.

Третье уравнение Максвелла

Является обобщением закона Кулона — поток вектора **D** через замкнутую поверхность S, охватывающую электрический заряд Q, равен этому заряду (теорема Гаусса — Остроградского):

$$\oint_S D_n\,dS = Q. \qquad (3.103)$$

D_n — проекция вектора **D** на нормаль к элементу поверхности dS.

Четвертое уравнение Максвелла

Является следствием того экспериментального факта, что линии магнитной индукции всегда замкнуты, следовательно, поток вектора через любую замкнутую поверхность равен нулю:

$$\oint_S B_n \, dS = 0, \qquad (3.104)$$

B_n — проекция вектора **B** на направление нормали к элементу поверхности dS.

Материальные уравнения изотропной среды

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E},$$
$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}, \qquad (3.105)$$
$$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}.$$

Последнее уравнение является обобщением закона Ома для токов проводимости; **j** — плотность тока, γ — удельная проводимость.

14. Переменный электрический ток

Мгновенное значение

$$i = \lim_{\Delta t \to 0} (\Delta Q / \Delta t) = dQ/dt, \qquad (3.106)$$

ΔQ — заряд, проходящий за промежуток времени Δt.

Сила переменного синусоидального тока и переменное напряжение

$$i = I_0 \sin(\omega t + \varphi_1), \qquad (3.107)$$

$$u = U_0 \sin(\omega t + \varphi_2), \qquad (3.108)$$

I_0, U_0 — амплитудные значения тока и напряжения, φ_1, φ_2 — начальные фазы.

Действующее или эффективное значение силы тока

Значение постоянного тока, который на том же самом резисторе развивает такую же мощность, что и переменный ток.
Для гармонических токов действующие значения тока и напряжения рассчитываются по формулам

$$I = I_0/\sqrt{2}, \quad U = U_0/\sqrt{2},$$

I_0, U_0 — амплитуды тока и напряжения.

Средняя мощность переменного гармонического тока

$$P = UI\cos\varphi = \frac{1}{2}U_0 I_0 \cos\varphi, \qquad (3.109)$$

$\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$ — разность фаз, $\cos\varphi$ — *коэффициент мощности.*

Фазовые диаграммы

Гармонические переменные токи и напряжения представляются фазовыми диаграммами; на этих диаграммах изображаются амплитуды I_0 и U_0 ориентированными отрезками (аналогично изображению векторов, хотя I_0 и U_0 не являются векторными величинами!); длины отрезков соответствуют амплитудам, углы с осью OX равны начальным фазам φ_1 и φ_2 (см. рис. 3.57). Предполагается, что ориентированные отрезки вращаются против часовой стрелки с угловой скоростью ω, которая равна угловой частоте изменения переменного тока.

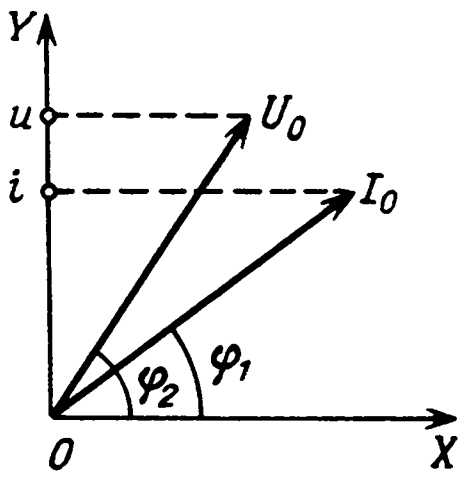
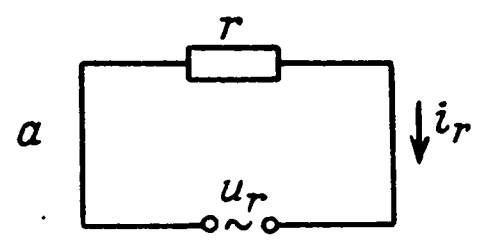
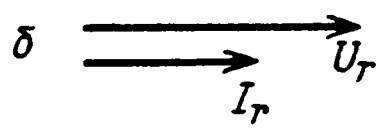
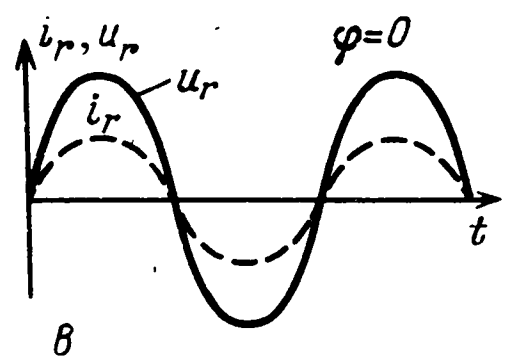


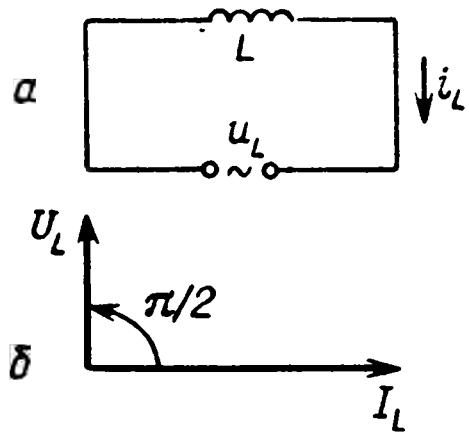
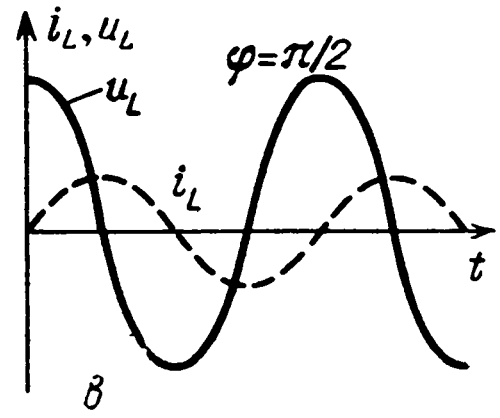
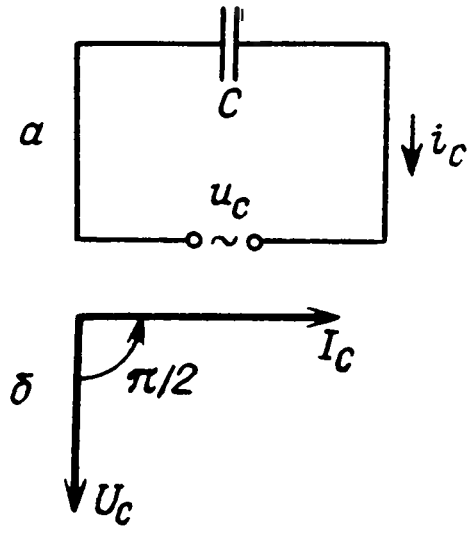
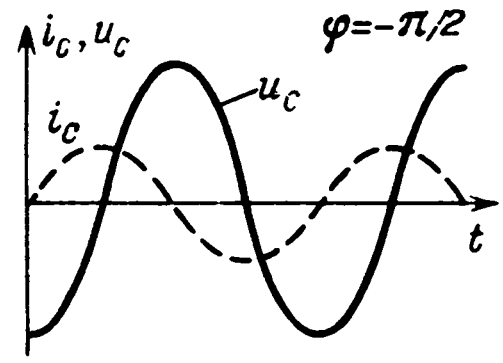
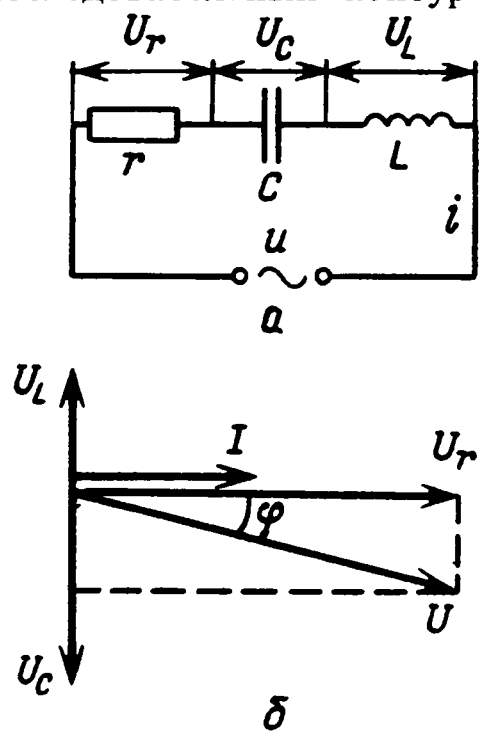
Рис. 3.57

Мгновенные значения i и u будут равны проекциям I_0 и U_0 на координатную ось.

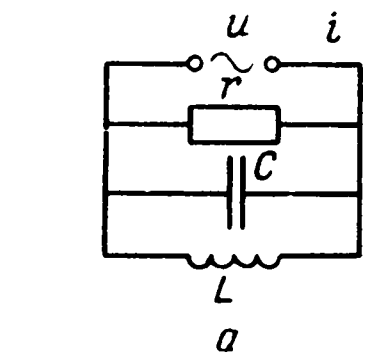
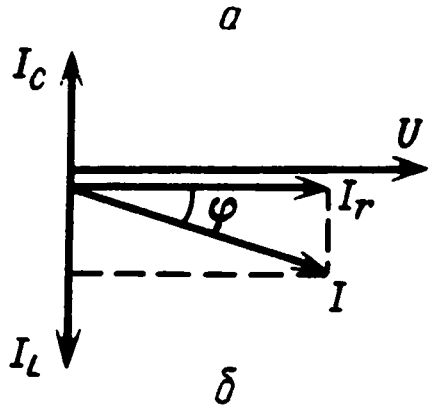
15. Основные формулы расчета цепей переменного тока

Схема цепи и фазовая диаграмма	Сопротивление	Графики тока и напряжения, разность фаз между i и u
а)  б) 	$r = U_r/I_r$ (3.110) — активное сопротивление	$\varphi = 0$ 

Продолжение

Схема цепи и фазовая диаграмма	Сопротивление	Графики тока и напряжения, разность фаз между i и u
	$r_L=\frac{U_L}{I_L}=\omega L$ (3.111) — индуктивное сопротивление	$\varphi=-\pi/2$ 
	$r_C=\frac{U_C}{I_C}=\frac{1}{\omega C}$ (3.112) — емкостное сопротивление	$\varphi=+\pi/2$ 
Последовательный контур 	$Z=\frac{U}{I}=\sqrt{r^2+(r_L-r_C)^2}.$ (3.113) В резонансе $r_L=r_C$; Z имеет минимальное значение	$\operatorname{tg}\varphi=(r_L-r_C)/r;$ $\varphi=\varphi_1-\varphi_2>0$, если $r_L>r_C$; $\varphi=\varphi_1-\varphi_2<0$, если $r_L<r_C$. Фазовая диаграмма на рисунке относится ко второму случаю. При резонансе $\varphi=0$

Продолжение

Схема цепи и фазовая диаграмма	Сопротивление	Графики тока и напряжения, разность фаз между i и u
Параллельный контур  *а*  *б*	$\frac{1}{Z^2}=\frac{I^2}{U^2}=\frac{1}{r^2}+\left(\frac{1}{r_L}-\frac{1}{r_C}\right)^2$. (3.114) В резонансе $r_L=r_C$; Z имеет максимальное значение.	$\operatorname{tg}\varphi=r\left(\frac{1}{r_L}-\frac{1}{r_C}\right)$. При резонансе $\varphi=0$

Примечание. Амплитудные значения переменных напряжений и токов обозначены соответственно: u_r-U_r, i_r-I_r, u_L-U_L, i_L-I_L, u_C-U_C, i_C-I_C, $u-U$, $i-I$.

16. Электрические колебания и электромагнитные волны

Электрические колебания	Ограниченные изменения электрических величин (заряда, силы тока, напряжения), повторяющиеся полностью или частично, относительно какого-либо среднего значения. Переменный электрический ток является одним из видов электрических колебаний.
Колебательный контур	Замкнутая электрическая цепь, состоящая из катушки индуктивностью L и конденсатора емкостью C.

Частота колебаний в контуре

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} \qquad (3.115)$$

(без затуханий, см. рис. 3.58);

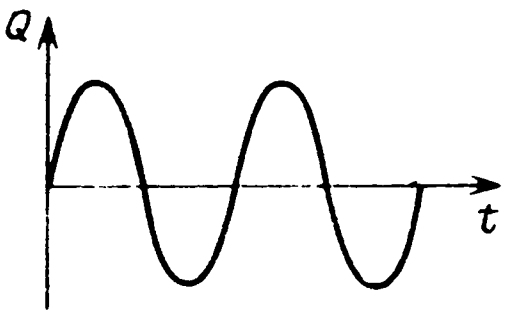


Рис. 3.58

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \qquad (3.116)$$

(затухающие колебания, см. рис. 3.59);

$$\delta = r/(2L).$$

Амплитуда тока при затухающих колебаниях уменьшается со временем

$$I = I_0 e^{-\delta t}$$

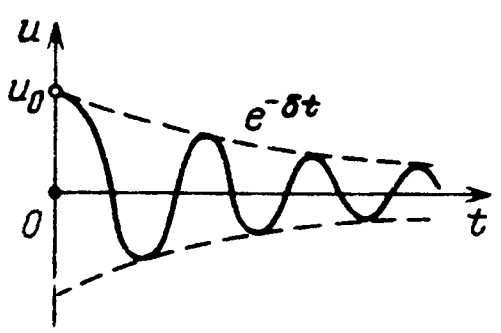


Рис. 3.59

Электромагнитные поле и волны

Совокупность переменных электрических и магнитных полей, которые неразрывно связаны друг с другом, называется *электромагнитным полем*. Электромагнитная волна — это распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле. Векторы напряженностей электрического и магнитного полей (**E** и **H**) в электромагнитной волне, распространяющейся в неограниченном пространстве, перпендикулярны друг другу, а направление распространения перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы **E** и **H** (рис. 3.60).

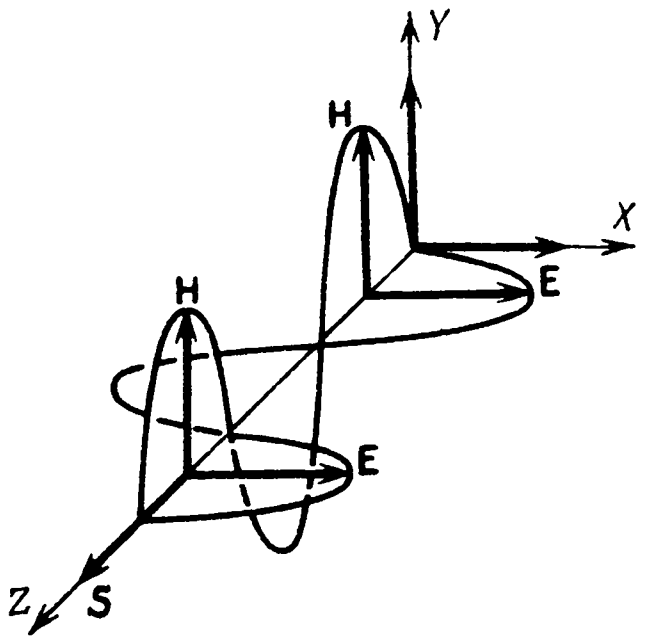


Рис. 3.60

Скорость электромагнитных волн в вакууме

$c = 2{,}997925 \cdot 10^8$ м/с

Скорость c не зависит от длины волны.

Скорость электромагнитных волн в других средах меньше скорости в вакууме

$$c_1 = c/n, \qquad (3.117)$$

n — показатель преломления среды (см. гл. IV).

Вектор Пойнтинга

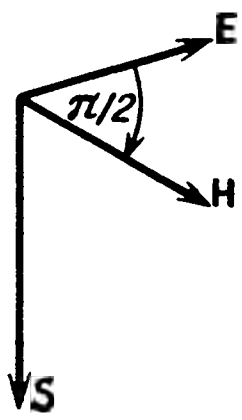


Рис. 3.61

Модуль $|\mathbf{S}|$ этого вектора равен энергии, переносимой электромагнитными волнами за время 1 с через плоскость площадью 1 м^2, расположенную перпендикулярно направлению распространения:

$$\mathbf{S}=[\mathbf{EH}]. \qquad (3.118)$$

Направление вектора $\mathbf{S}$ совпадает с направлением распространения волны в изотропной среде.

Излучение электромагнитных волн

Рис. 3.62

Заряженные частицы, движущиеся с ускорением, излучают электромагнитные волны.

Средний поток электромагнитных волн, излучаемых диполем, электрический момент p которого изменяется по гармоническому закону $Q_0 l_0 \cos\omega t$ (вследствие изменения зарядов Q или изменения расстояния l между ними):

$$\Phi_д = Q_0^2 l_0^2 \omega^4/(12\pi\varepsilon_0 c^3), \qquad (3.119)$$

$Q_0 l_0 = p_0$ — амплитуда колебаний p, Q_0 — амплитуда колебаний Q, l_0 — амплитуда колебаний l, ε_0 — электрическая постоянная, ω — угловая частота, c — скорость света в вакууме.

Антенны

Излучателем электромагнитных волн являются проводники с переменными токами. Наиболее эффективно излучение происходит тогда, когда размеры излучателя сравнимы с длиной волны излучения. Проводники, эффективно излучающие (или принимающие) электромагнитные волны, называются *антеннами*.

Линейным элементом тока $i\Delta l$, в котором сила тока изменяется по гармоническому закону

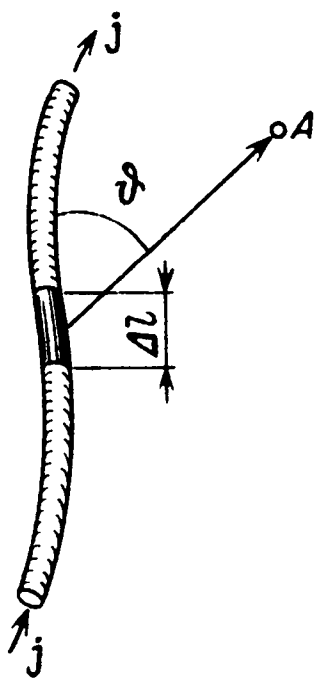


Рис. 3.63

$i = I_0 \cos \omega t$, излучают электромагнитные волны, в которых напряженности электрического и магнитного полей равны соответственно:

$$E = \frac{1}{2 c \lambda r \varepsilon_0} I_0 \Delta l \sin \vartheta \cos(\omega t - kr),$$

$$H = \frac{1}{2 \lambda r} I_0 \Delta l \sin \vartheta \cos(\omega t - kr), \quad (3.120)$$

ϑ — угол между прямой, соединяющей линейный элемент тока с точкой наблюдения и направлением вектора плотности тока $\mathbf{j}$, $k = 2\pi/\lambda$ — *волновое число*, λ — длина волны, r — расстояние между элементом тока и точкой A, в которой определяются напряженности, причем $r \gg \lambda$, $\Delta l \ll r$ (рис. 3.63), c — скорость света.

Глава IV
Оптика

Оптическое излучение (свет) — электромагнитное излучение с длинами волн от 0,01 нм до 1 см. Излучение с длинами волн от 400 нм до 800 нм называется *видимым*.

1. Фотометрические величины

Энергетические величины	Световые величины
Энергетический поток — энергия, переносимая волнами за время 1 с $\Phi_э = \Delta W / \Delta t.$ (4.1) Единица — ватт, Вт	*Световой поток* — энергетический поток, который оценивается по зрительному воздействию на глаз человека: $\Delta\Phi = I\Delta\Omega.$ (4.1а) I — сила света (см. (4.3а)). Единица — люмен, лм
Энергетическая освещенность — отношение энергетического потока $\Delta\Phi$, к площади ΔS облучаемой им поверхности: $E = \Delta\Phi_э / \Delta S.$ (4.2) Единица — ватт на квадратный метр, Вт/м^2	*Освещенность* — отношение светового потока $\Delta\Phi$ к площади ΔS облучаемой им поверхности: $E = \Delta\Phi / \Delta S.$ (4.2а) Единица — люкс, лк
Энергетическая сила света — отношение энергетического потока $\Delta\Phi_э$ к телесному углу $\Delta\Omega$, в котором распределено это излучение: $I_э = \Delta\Phi_э / \Delta\Omega.$ (4.3) Единица — ватт на стерадиан, Вт/ср	*Сила света* — отношение светового потока $\Delta\Phi$ к телесному углу $\Delta\Omega$: $I = \Delta\Phi / \Delta\Omega.$ (4.3а) Единица — кандела, кд (одна из основных единиц СИ)
Энергетическая светимость — отношение энергетического потока $\Delta\Phi_э$ к площади излучающей поверхности источника $\Delta S_и$: $R_э = \Delta\Phi_э / \Delta S_и.$ (4.4)	*Светимость* — отношение светового потока $\Delta\Phi$ к площади излучающей поверхности $\Delta S_и$: $R = \Delta\Phi / \Delta S_и.$ (4.4а)

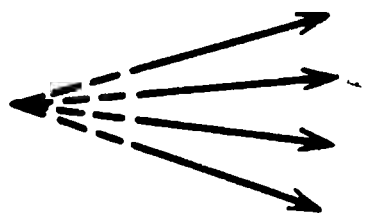
Продолжение

Энергетические величины	Световые величины
Энергетическая яркость — отношение энергетической силы света $\Delta I_э$ к проекции излучающей поверхности источника $\Delta S_и \cos\varphi$ на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения: $B_э = \Delta I_э/(\Delta S_и \cos\varphi)$, (4.5)	*Яркость* — отношение силы света ΔI к площади проекции излучающей поверхности источника $\Delta S_и \cos\varphi$ на плоскость, перпендикулярную направлению, по которому определяется яркость: $B = \Delta I/(\Delta S_и \cos\varphi)$. (4.5а)

φ — угол между нормалью к излучающей поверхности $\Delta S_и$ и направлением, по которому определяется яркость.

Примечание: Освещенность, создаваемая точечным источником, рассчитывается по формуле: $E_т = I\cos\varphi/r^2$ (I — сила света, r — расстояние от источника до поверхности, φ — угол между нормалью к поверхности и направлением распространения волн).

2. Геометрическая оптика

Луч (световой луч)	Геометрическая линия, вдоль которой распространяется энергия электромагнитных волн.
Гомоцентрический пучок  Рис. 4.1	Прямолинейные лучи (или их продолжение), пересекающиеся в одной точке; параллельные лучи относятся к гомоцентрическому пучку, центр которого находится в бесконечности.
Параксиальные лучи	Лучи, составляющие малый угол с осью; параллельные лучи являются параксиальными, если проходят на малом расстоянии от оси.
Условия применимости геометрической оптики	Площадь волнового фронта Q, который ограничивается входным отверстием линзы, должна быть зна-

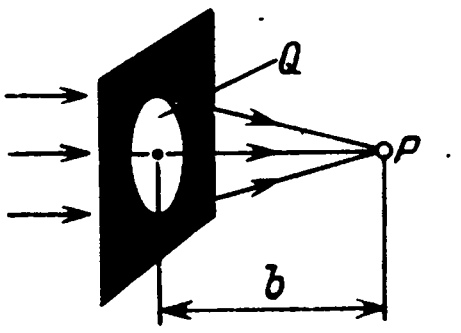


Рис. 4.2

чительно больше произведения $b\lambda$ (b — расстояние от линзы до точки наблюдения P, λ — длина волны), т. е. $Q \gg b\lambda$ (рис. 4.2).

Закон отражения

$$i = i'$$

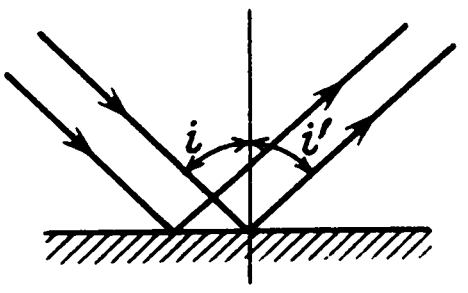


Рис. 4.3

При падении луча на границу раздела двух изотропных сред угол отражения i' равен углу падения i; падающий и отраженный лучи и перпендикуляр к поверхности в точке падения лежат в одной плоскости (рис. 4.3).

В зависимости от свойств границы раздела различают два вида отражения света. Если поверхность раздела имеет неровности, размеры которых значительно меньше длины волны света, то происходит правильное (или зеркальное) отражение. В этом случае падающие параллельные лучи света после отражения остаются параллельными. Если неровности расположены на отражающей поверхности хаотично и имеют размеры, сравнимые с длиной волны, то происходит диффузное отражение (рис. 4.4). При условии $h\cos i \ll \lambda$ (h — размеры неровностей, i — угол падения лучей) будет зеркальное отражение.

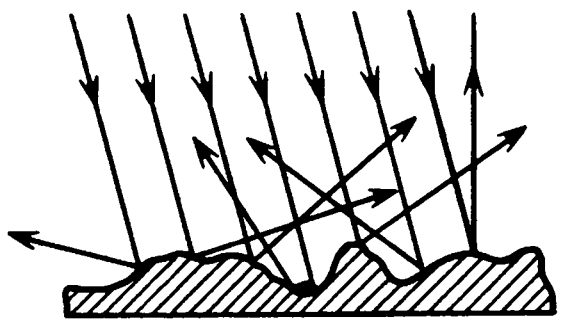


Рис. 4.4

Закон преломления

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n \qquad (4.6)$$

Отношение синуса угла падения i к синусу угла преломления r есть величина постоянная для данной длины волны и границы раздела сред; падающий и преломленный лучи и

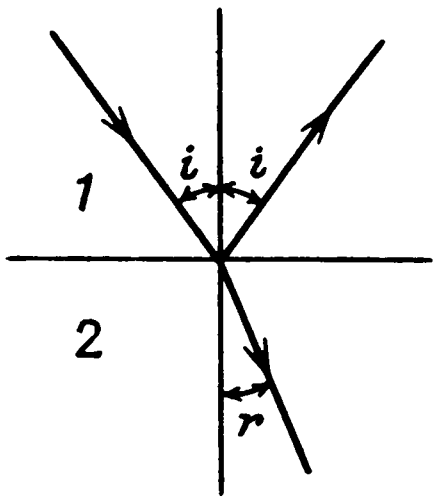


Рис. 4.5

перпендикуляр к поверхности в точке падения лежат в одной плоскости (рис. 4.5). Величина n называется *оносительным показателем преломления* второй среды относительно первой:

$$n = c_1 / c_2 \qquad (4.7)$$

(c_1, c_2 — скорости света в средах 1 и 2); n зависит от длины волны. Среда, в которой скорость света меньше, чем в другой среде, называется оптически более плотной.

Полное отражение

При переходе из среды оптически более плотной, в среду оптически менее плотную, луч света может полностью отражаться. Это явление называется полным отражением. Угол падения $i_{пр}$, начиная с которого электромагнитное излучение полностью отражается от границы раздела, называется предельным углом полного отражения, который определяется из соотношения

$$\sin i_{пр} = 1/n$$

($n = c_1/c_2$, c_2 — скорость света в оптически более плотной среде, рис. 4.6).

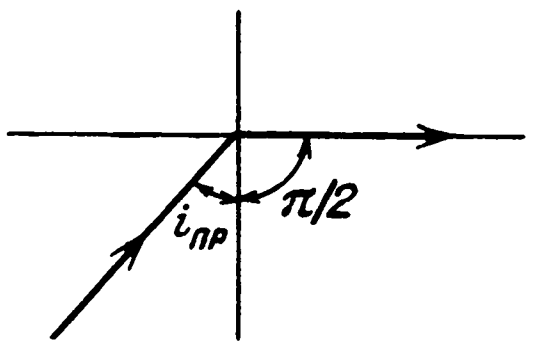


Рис. 4.6

Ход лучей через призму

Продолжения входящего и выходящего лучей образуют угол отклонения δ.

Показатель преломления n стекла, из которого сделана призма, можно рассчитать по формуле (рис. 4.7)

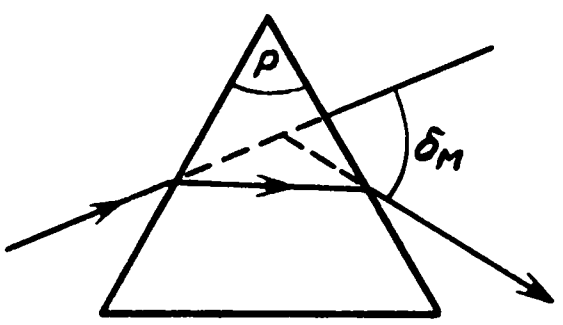


Рис. 4.7

$$n = \sin(\delta_м/2 + P/2) / \sin(P/2) \qquad (4.8)$$

($\delta_м$ — наименьший угол отклонения, P — преломляющий угол призмы).

Линза

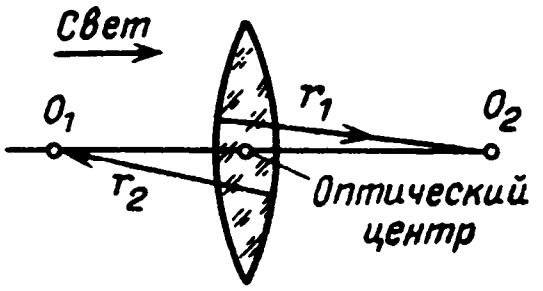


Рис. 4.8

Прозрачное тело, ограниченное с противоположных сторон криволинейными поверхностями (рис. 4.8); в частном случае одна из поверхностей может быть плоской. Линза называется тонкой, если ее толщина значительно меньше радиусов кривизны ее сферических поверхностей.

Главная оптическая ось

Прямая, проходящая через центры радиусов кривизны O_1, O_2 поверхностей; при наличии плоской поверхности оптическая ось проходит перпендикулярно этой поверхности.

Оптический центр

Точка тонкой линзы, через которую лучи проходят без изменения направления.

Фокусы, фокальные плоскости

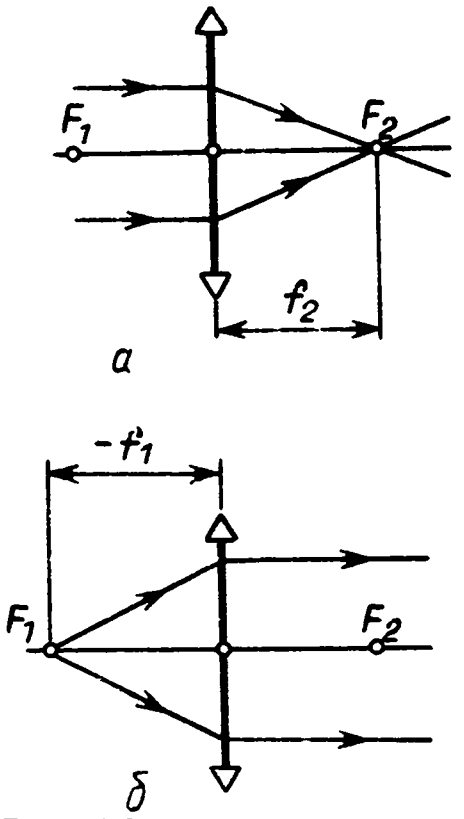


Рис. 4.9

Линза называется *собирающей*, если она преобразует параллельный пучок лучей в сходящийся; в противном случае линза называется *рассеивающей*. Точка F_2 на главной оптической оси, в которой пересекаются параксиальные лучи, параллельные главной оптической оси собирающей линзы, называется задним фокусом (рис. 4.9). В рассеивающей линзе параксиальный пучок лучей, параллельный главной оптической оси, преобразуется в расходящийся пучок; продолжения этих лучей пересекаются в точке, лежащей на главной оптической оси; эта точка F_2 называется задним фокусом рассеивающей линзы (рис. 4.10).

Расстояние от оптического центра тонкой линзы до фокуса называется *фокусным расстоянием*.

Плоскости, проходящие через фокусы перпендикулярно оптической

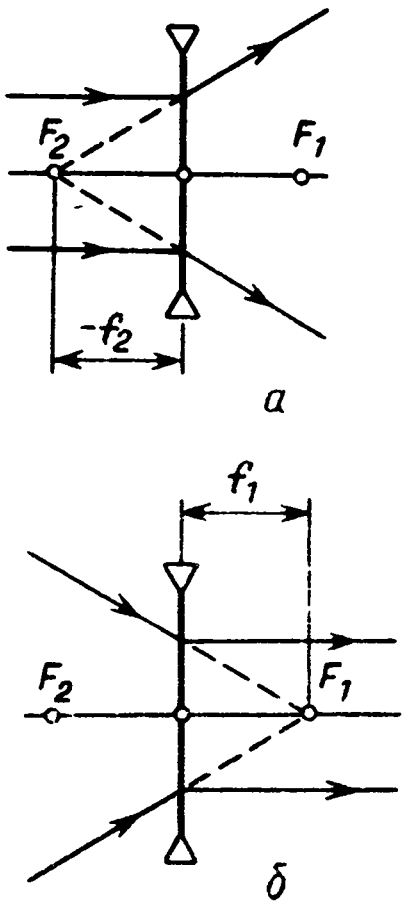


Рис. 4.10

оси, называются фокальными плоскостями.

У линзы имеется два фокуса (рис. 4.9, 4.10): передний фокус F_1 и задний фокус F_2. Если среды по обе стороны линзы одинаковы, то модули фокусных расстояний равны.

Формула тонкой линзы (для параксиальных лучей)

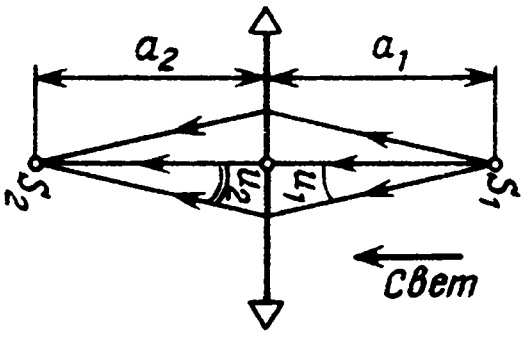


Рис. 4.11

Если точечный источник света поместить на главной оптической оси на расстоянии a_1 от линзы $(a_1 > f)$, то на расстоянии a_2 получится его изображение (рис. 4.11). Величины a_1, a_2, f связаны соотношением

$$-\frac{1}{a_1}+\frac{1}{a_2}=\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right), \tag{4.9}$$

r_1, r_2 — радиусы кривизны поверхностей, n — относительный показатель преломления стекла.

Правило знаков

При расчетах значения a_1 и a_2 подставляются со знаком плюс, если направления их отсчета от оптического центра линзы совпадают с направлением распространения света; значения r_1 и r_2 также подставляются со знаком плюс, если их направления отсчета от вершин сферических поверхностей совпадают с направлением распространения света; в противном случае значения a_1, a_2, r_1, r_2 подстав-

ляются со знаком минус. Радиус кривизны r_1 относится к той поверхности линзы, которая первой пересекается лучом; значения f собирающей линзы подставляются со знаком плюс, рассеивающей — со знаком минус (рис. 4.12).

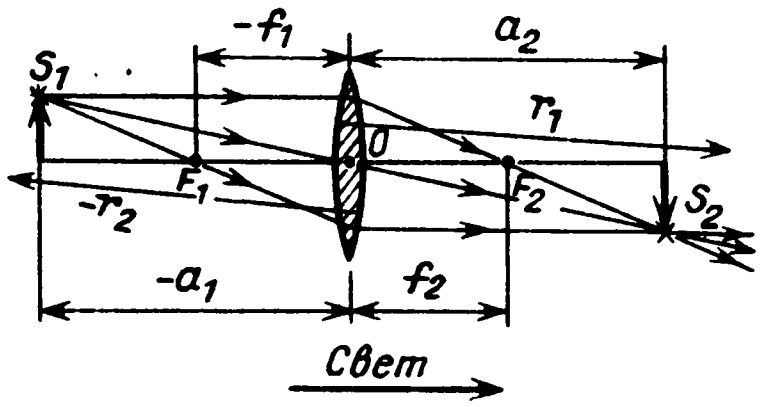


Рис. 4.12

Оптическая сила линзы

$$\Phi_л = \frac{n}{f}.$$

Отношение показателя преломления окружающей линзу среды к фокусному расстоянию линзы. Единица оптической силы — диоптрия (дптр), 1 дптр — это оптическая сила линзы, расположенной в воздухе, с фокусным расстоянием 1 м.

$$\Phi_л = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2/n, \qquad (4.10)$$

Φ_1, Φ_2 — оптические силы сферических поверхностей линзы, d — ее толщина, n — показатель преломления стекла. Оптическая сила собирающей линзы положительна, рассеивающей — отрицательна.

Оптическая сила сферической границы

Оптическая сила сферической границы раздела двух сред рассчитывается по формуле

$$\Phi = (n_2 - n_1)/r, \qquad (4.11)$$

n_1 — показатель преломления той среды, которую луч проходит первой, n_2 — показатель преломления второй среды, r — радиус кривизны.

Оптическая сила тонкой линзы $\Phi_{т.л}=\Phi_1+\Phi_2$. (4.12)

Оптическая сила двух тонких линз равна сумме их оптических сил, при условии что $d<|f|$, d — расстояние между оптическими центрами линз, $|f|$ — модуль наименьшего фокусного расстояния одной из линз.

3. Оптические приборы

Глаз

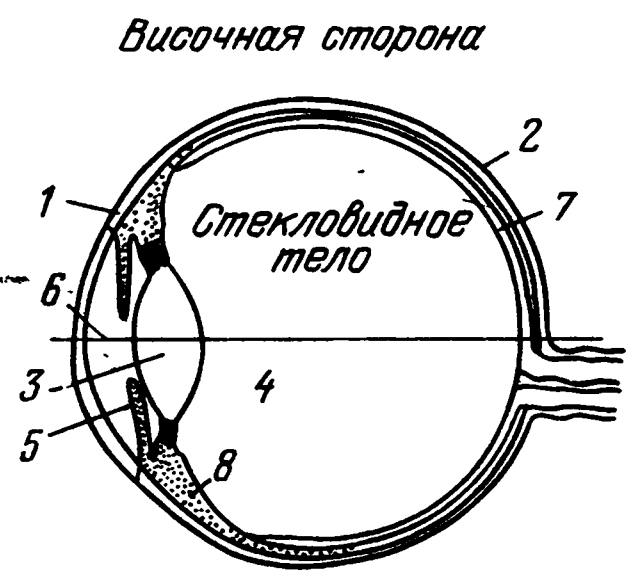


Рис. 4.13

Глаз рассматривается как оптическая система. На рис. 4.13 представлен горизонтальный разрез глазного яблока. Впереди находится прозрачная оболочка — роговица *1*, образующая почти сферическую поверхность. По краям роговица переходит в склеру *2* (белок глаза), которая покрывает остальную поверхность глазного яблока. Пространство между хрусталиком *3* и роговицей заполнено средой, состоящей из 99% воды, остальное — соли, белки. За хрусталиком находится стекловидное тело *4*, состоящее в основном из воды. Форма глазного яблока почти сферическая с радиусом кривизны около 12 мм. Имеется радужная оболочка *5* с отверстием *6* (зрачком); диаметр зрачка изменяется от 2 до 8 мм. На противоположной стороне от зрачка расположена сетчатка *7*, где находятся светочувствительные рецепторы — палочки и колбочки (около $1{,}2\cdot10^8$ палочек, $7\cdot10^6$ колбочек). Палочки реагируют на дневное зрение, колбочки обеспечивают сумеречное зрение. Можно считать, что оптический центр расположен вблизи роговицы, фокусные расстояния $f_1=17$ мм, $f_2=23$ мм. Оптическая

сила глаза равна приблизительно 58 дптр. Кривизна поверхности хрусталика может изменяться мышцами *8* глаза, вследствие чего изменяется и оптическая сила: в молодом возрасте изменения могут осуществляться в пределах 10 дптр, в старческом возрасте около 2 дптр.

Изменение оптической силы глаза позволяет получать на сетчатке изображения предметов, расположенных на различных расстояниях от глаза.

Угол зрения

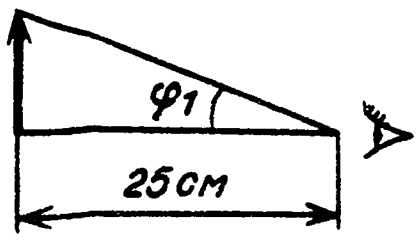


Рис. 4.14

Угол, образованный лучами, которые проходят через крайние точки предмета (или его изображения) и оптический центр глаза (рис. 4.14).

Видимое увеличение

Видимое увеличение оптического прибора

$$\Gamma = \operatorname{tg}\varphi_2 / \operatorname{tg}\varphi_1, \qquad (4.13)$$

φ_2 — угол зрения при наблюдении предмета через прибор, φ_1 — угол зрения при наблюдении предмета невооруженным глазом, который должен быть расположен на расстоянии: а) 25 см от глаза, если видимое увеличение определяется для лупы или микроскопа (рис. 4.14); б) при расчете видимого увеличения зрительных труб угол зрения определяется для расстояния, на котором находится предмет от оптического прибора.

Линейное увеличение

Отношение поперечного размера изображения к поперечному размеру предмета.

Это увеличение иначе называется поперечным.

Угловое увеличение

Отношение тангенса угла u_2 в пространстве изображений к тан-

генсу угла u_1 в пространстве предметов (рис. 4.11).

Объектив и окуляр

В оптическом приборе линза, обращенная к предмету (объекту), называется *объективом*, линза, обращенная к глазу, называется *окуляром*. В большинстве случаев объективы и окуляры приборов состоят из нескольких линз; этим частично устраняются погрешности в изображениях.

Лупа

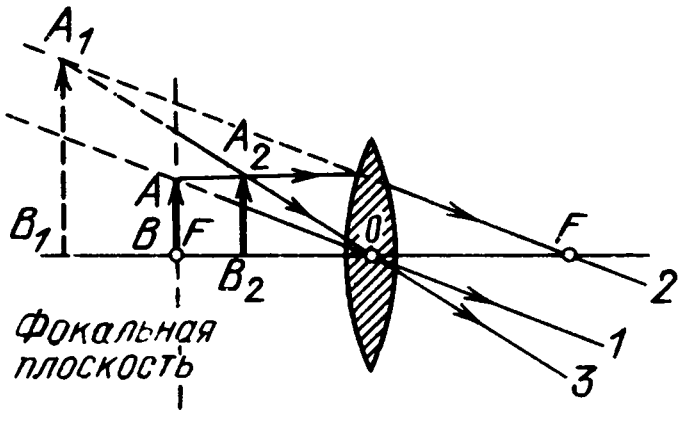


Рис. 4.15

Ход лучей показан на рис. 4.15. Видимое увеличение лупы

$$\Gamma_л = 250/f, \qquad (4.14)$$

f — фокусное расстояние лупы (мм); предмет AB находится в фокальной плоскости.

Микроскоп

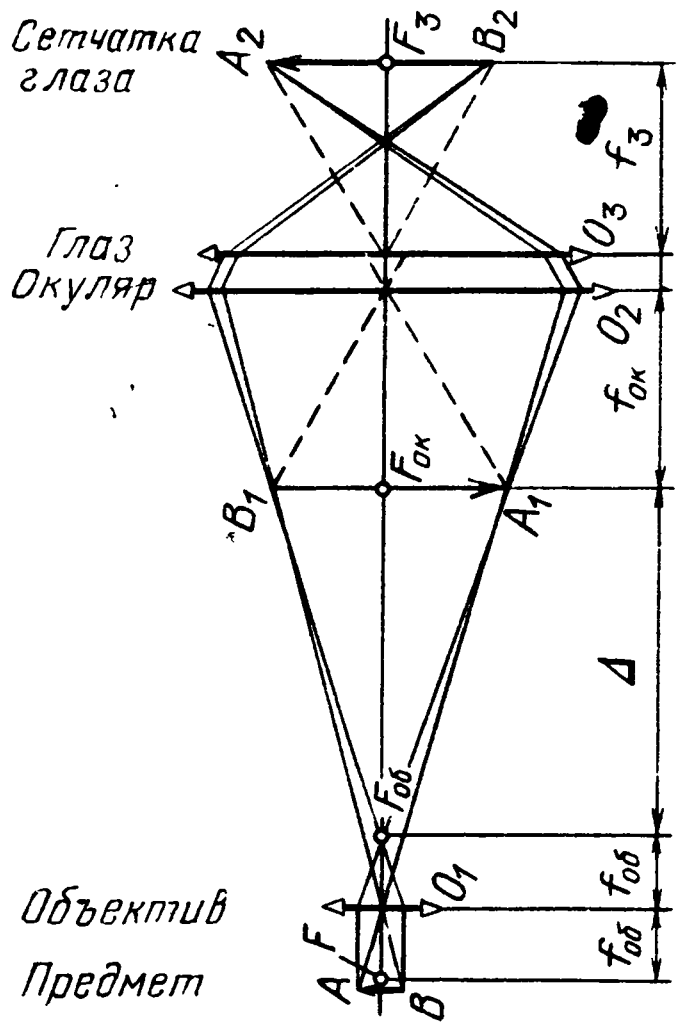


Рис. 4.16

Ход лучей показан на рис. 4.16; предмет AB расположен вблизи фокальной плоскости объектива. Видимое увеличение микроскопа

$$\Gamma_м = 250\Delta/(f_{об}f_{ок}), \qquad (4.15)$$

$f_{об}$, $f_{ок}$ — фокусные расстояния объектива и окуляра (мм); f_3 — фокусное расстояние глаза; Δ — оптический интервал микроскопа, расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра (мм) (рис. 4.16).

Зрительная труба

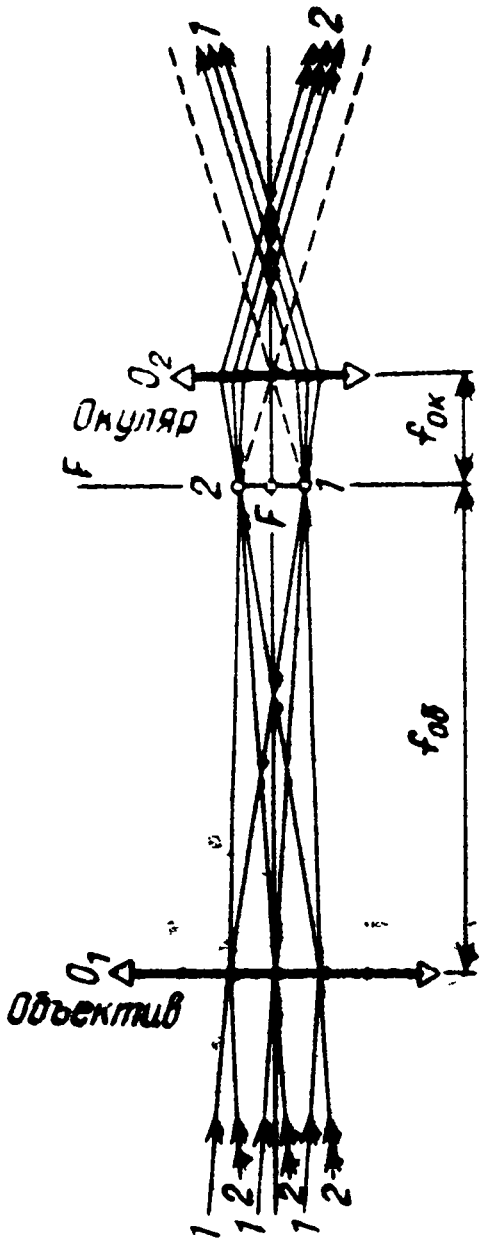


Рис. 4.17

Ход лучей в зрительной трубе, установленной на бесконечность, показан на рис. 4.17.

Лучи *111* выходят из бесконечно удаленной точки предмета, расположенной выше оптической оси, лучи *222* выходят из точки, расположенной ниже оптической оси. Видимое увеличение зрительной трубы

$$\Gamma_{тр} = f_{об} / f_{ок}, \qquad (4.16)$$

$f_{об}$, $f_{ок}$ — фокусные расстояния объектива и окуляра.

4. Волновая оптика

Интерференция

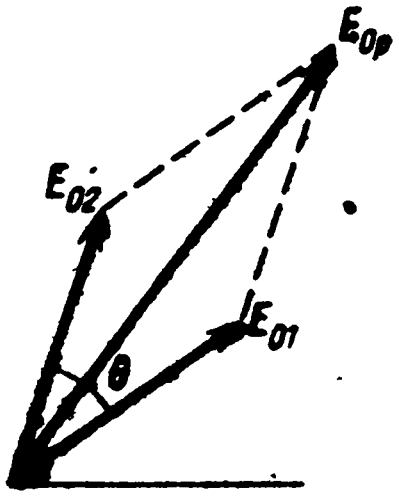


Рис 4 18

Сложение двух (или нескольких) волн с одинаковыми периодами, в результате которого в одних точках пространства происходит увеличение, а в других — уменьшение амплитуды результирующей волны.

При взаимодействии двух волн, имеющих одинаковые направления векторов **E**, результирующую амплитуду E_{0p} можно рассчитать по фазовой диаграмме (рис. 4.18):

$$E_{0p}^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\cos\theta, \qquad (4.17)$$

E_{01}, E_{02} — амплитуды волн, раз-

ность фаз

$$\theta=\frac{2\pi}{\lambda}(n_2x_2-n_1x_1)+\varphi_2-\varphi_1, \quad (4.18)$$

φ_1, φ_2 — начальные фазы, x_1, x_2 — расстояния, которые проходят волны в средах с показателями преломления n_1 и n_2.

Оптическая длина пути — Произведение длины пути x, проходимого волной, и показателя преломления среды n, т. е. xn.

Разность хода волн — Разность оптических длин путей:

$$\Delta=n_2x_2-n_1x_1. \quad (4.19)$$

Интенсивность — Величина, пропорциональная квадрату амплитуды E_0 (или H_0) $I\sim E_0^2\sim H_0^2$ (см. гл. I, п. 22).

Некогерентные волны — Волны, у которых разность фаз изменяется хаотически; в этом случае среднее значение $\langle\cos\theta\rangle=0$,

$E_{0p}^2=E_{01}^2+E_{02}^2$,

результирующая интенсивность

$I_p=I_1+I_2$,

т. е. интенсивности I_1 и I_2 суммируются, а интерференция отсутствует.

Когерентные волны — Волны, у которых разность фаз в данной точке не изменяется во времени (или меняется незначительно). Интерференция наблюдается в тех случаях, когда волны являются когерентными. При наличии постоянной разности фаз рассмотрим два предельных случая, соответствующие максимумам и минимумам интенсивности (рис. 4.19).

а) Когда $\cos\theta=+1$,

$$I_p=I_1+I_2+2\sqrt{I_1I_2}.$$

В этом случае интенсивность увеличивается.

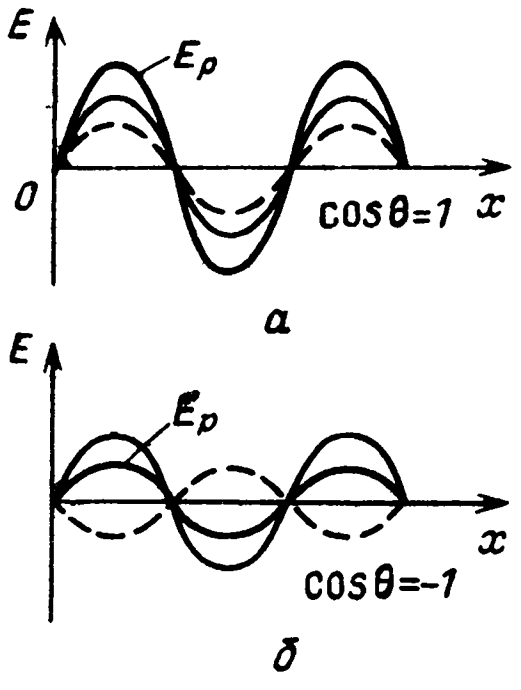


Рис. 4.19

б) Если $\cos\theta=-1$, то интенсивность уменьшается:

$$I'_{\text{р}}=I_1+I_2-\sqrt{I_1 I_2}.$$

Условия когерентности (волны не поляризованные)

В реальных условиях интерференция наблюдается при наличии двух условий:

$$l\ll\frac{\lambda}{2n\sin u},\quad \Delta\lambda\ll\frac{\lambda}{m};\qquad (4.20)$$

l — линейные размеры источника, λ — длина волны, $2u$ — угол между крайними лучами, выходящими из одной точки источника, $\Delta\lambda$ — интервал длин волн немонохроматического излучения, $m=\delta/\lambda$ — порядок интерференции, δ — разность хода волн.

Получение когерентных волн при освещении плоскопараллельной пластинки

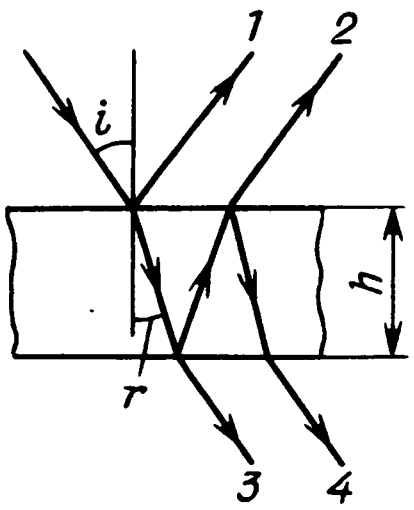


Рис. 4.20

При освещении плоскопараллельной пластинки (рис. 4.20) происходит интерференция волн *1*, *2* (в отраженном свете), а также волн *3*, *4* (в проходящем свете).
В этом случае разность хода волн *1* и *2*, а также волн *3* и *4*

$$\Delta=2hn\cos r.$$

Разность фаз у отраженных волн *1* и *2* (для векторов **E**)

$$\theta_{12}=(4\pi nh\cos r)/\lambda+\pi;\qquad (4.21)$$

разность фаз у проходящих волн *3* и *4* (также для векторов **E**)

$$\theta_{34}=(4\pi nh\cos r)/\lambda;\qquad (4.22)$$

h — толщина пластинки, r — угол преломления, n — показатель преломления материала, из которого изготовлена пластинка, λ — длина волны в вакууме.

Дифракция

Изменение направления распространения электромагнитных волн.

когда они проходят вблизи краев экранов, отверстий или других неоднородностей; при этом искажается их волновой фронт.

Дифракция на щели

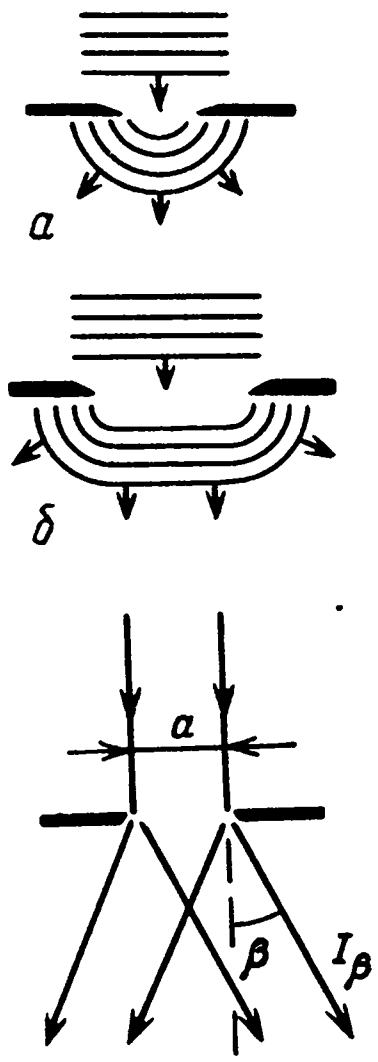


Рис. 4.21

Искажение фронта плоской волны при дифракции на узкой (*а*) и широкой (*б*) щели показано на рис. 4.21. При дифракции плоских волн, падающих нормально на узкую длинную щель, интенсивность I_β волн, распространяющихся под углом дифракции β, определяется следующим соотношением:

$$I_\beta = I_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{1}{2} ka \sin\beta\right)}{\frac{1}{2} ka \sin\beta} \right)^2, \qquad (4.23)$$

$k = 2\pi/\lambda$, a — ширина щели, I_0 — интенсивность волн, распространяющихся в первоначальном направлении (рис. 4.21, *в*).

Главные минимумы

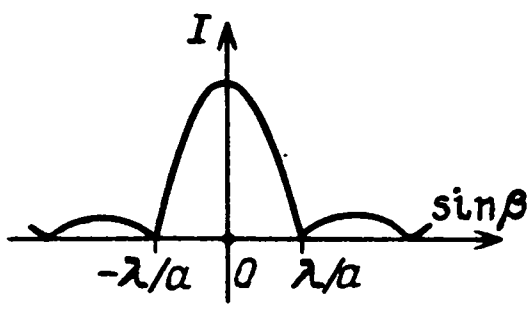


Рис. 4.22

Направления, в которых интенсивность дифрагированных волн на щели равна нулю (рис. 4.22),

$$a \sin\beta_{\text{мин}} = m\lambda$$
$$(m = \pm 1, \ \pm 2, \ \ldots). \qquad (4.24)$$

Дифракционная решетка

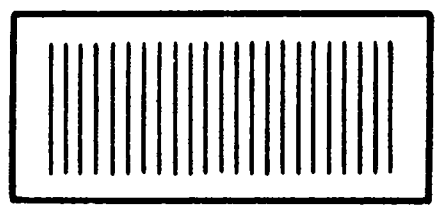


Рис. 4.23

Представляет собой в идеальном случае большое количество узких параллельных щелей, имеющих одинаковую ширину a и одинаковые промежутки между ними b (рис. 4.23).

Расстояние $d = a + b$ называется *постоянной* (или *периодом*) *решетки*.

Главные максимумы

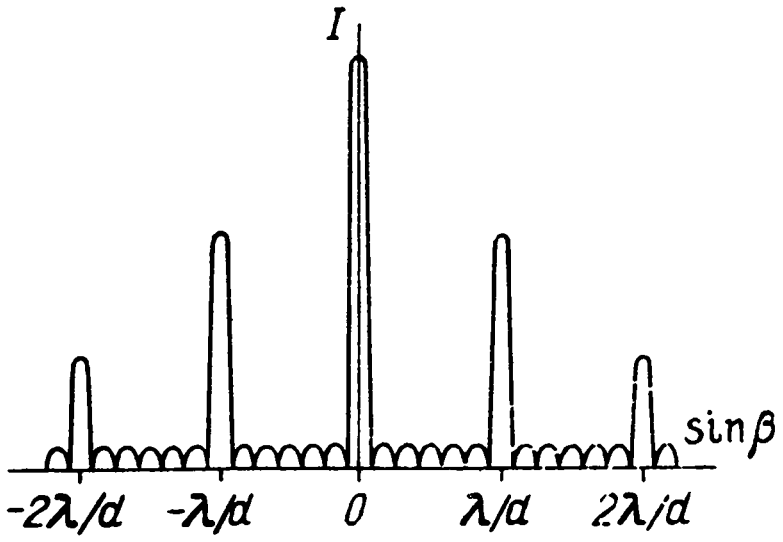


Рис. 4.24

Направления, в которых наблюдается максимальная интенсивность дифрагированных волн (рис. 4.24):

$$d\sin\beta_{\text{макс}} = m\lambda$$

$$(m = 0,\ \pm 1,\ \pm 2\ldots), \qquad (4.25)$$

d — период решетки; это условие выполняется для волн, которые падают нормально на плоскость решетки.

Дополнительные минимумы

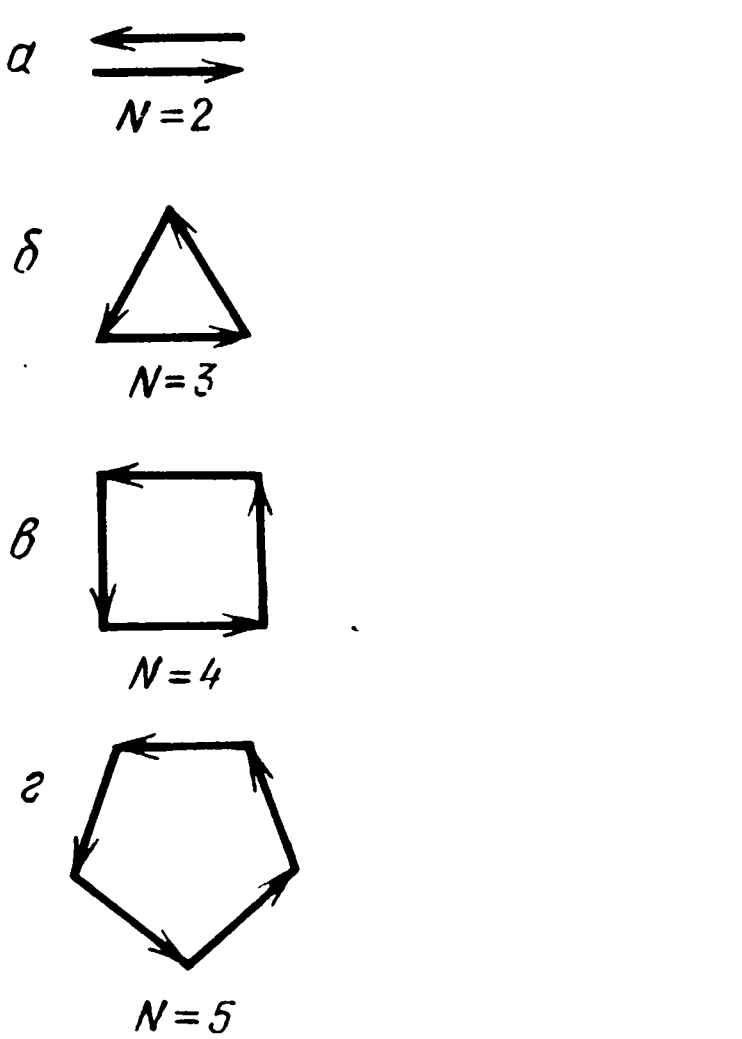


Рис. 4.25

Направления, в которых дифрагированные волны, проходящие через все щели решетки, гасят друг друга. При нормальном падении волн на решетку дополнительные минимумы определяются соотношением

$$d\sin\beta_{\text{дм}} = \frac{m'}{N}\lambda, \qquad (4.26)$$

N — число щелей в решетке, $m' = \pm 1,\ \pm 2,\ \pm 3,\ \ldots,\ N-1,\ N+1,\ \ldots$ Значения m', кратные N, исключаются из ряда целых чисел.

На рис. 4.25 приведены фазовые диаграммы, соответствующие дополнительным минимумам при дифракции волн от двух, трех, четырех и пяти щелей (см. с. 132).

Предел разрешения

Дифракция световых волн не позволяет различать мельчайшие детали предметов с помощью оптических приборов, как бы велико ни было их увеличение. Наименьшее расстояние между двумя точками, при котором их изображения не сливаются, называется *пределом разрешения* оптического прибора. Для микроскопа предел разреше-

ния

$$l_p \geqslant \lambda/(2n\sin u), \qquad (4.27)$$

u — апертурный угол (половина угла между крайними лучами, падающими от точки предмета на объектив и достигающими глаза наблюдателя или экрана), n — показатель преломления среды.

Дисперсия

Зависимость скорости света (или показателя преломления) в среде от длины волны (частоты). Вследствие дисперсии после преломления параллельного пучка белого света стеклянной призмой во́лны различной длины распространяются по различным направлениям: волны с меньшей длиной отклоняются к основанию призмы на бо́льший угол по сравнению с волнами, имеющими бо́льшую длину (рис. 4.26).

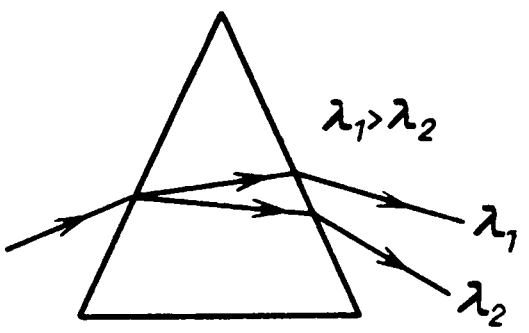


Рис. 4.26

Поляризация света

Плоскостью поляризации (рис. 4.27) называется плоскость, в которой лежат векторы **E** и **S** (**S** — вектор Пойнтинга, см. гл. III). Если плоскость поляризации волны не изменяет своего положения в пространстве, то такая волна называется линейно поляризованной.

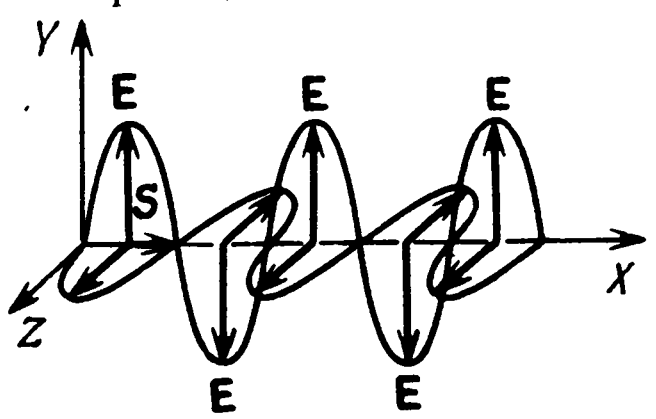


Рис. 4.27

Свет, в котором положение плоскости поляризации изменяется хаотически, называется естественным.

Поляризации при отражении

Естественный свет при отражении от поверхности диэлектриков частично поляризуется. Отраженный свет становится полностью поляризованным при угле падения, определяемом соотношением

$$\mathrm{tg}\, i_Б = n \qquad (4.28)$$

(n — относительный показатель

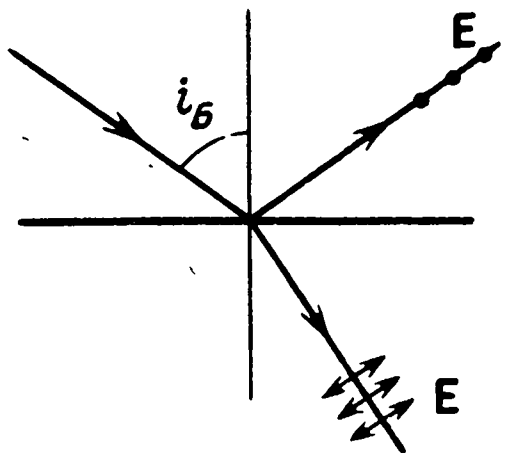


Рис. 4.28

преломления второй среды), при этом плоскость поляризации перпендикулярна плоскости падения (рис. 4.28). Угол $i_Б$ называется *углом Брюстера*. Проходящий через диэлектрик свет частично поляризован, при этом преимущественные направления векторов **E** параллельны плоскости падения.

Устройства, которые преобразуют естественный свет в поляризованный, называются *поляризаторами*. При отражении от металлов свет не поляризуется.

Двойное лучепреломление

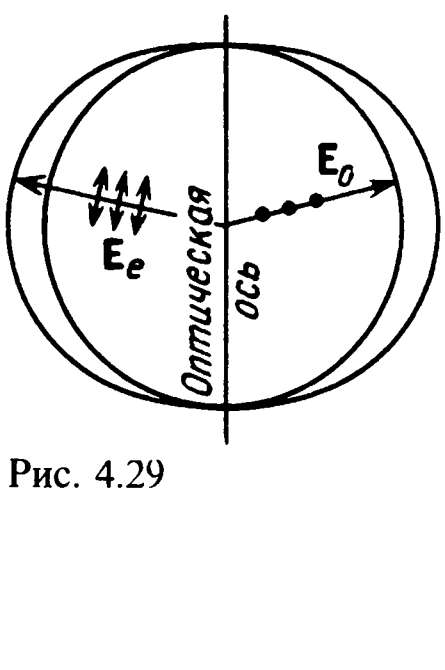


Рис. 4.29

В некоторых монокристаллах (например, кварц, исландский шпат, слюда, гипс) естественный свет разделяется на две линейно поляризованные в различных плоскостях волны, которые распространяются с различными скоростями. Это явление называется *двойным лучепреломлением*.

В одноосных кристаллах (типа кварца) имеется одно направление, в котором не наблюдается двойного лучепреломления. Это направление называется оптической осью. Волна, в которой вектор $\mathbf{E}_0$ перпендикулярен оптической оси кристалла, называется *обыкновенной*; ее скорость по различным направлениям в кристалле одинакова. Вторая волна, у которой направление вектора $\mathbf{E}_e$ составляют различные углы с оптической осью (в зависимости от угла падения и положения плоскости падения), называется *необыкновенной*. Скорость необыкновенной волны в кристалле зависит от направления; она может быть или больше скорости обыкновенной волны (как в исландском

шпате), или меньше (как в кварце). В направлении оптической оси скорости обыкновенной и необыкновенной волн равны (рис. 4.29).

Искусственное двойное лучепреломление

Наблюдается в изотропных средах при воздействии на них механических напряжений (фотоупругость), электрического поля (электрическое двойное лучепреломление), магнитного поля (магнитное двойное лучепреломление).

При одностороннем сжатии или растяжении изотропного тела в направлении оси OZ его оптические свойства становятся аналогичными свойствам оптического одноосного монокристалла, оптическая ось которого направлена параллельно оси OZ (рис. 4.30). В электрических и магнитных полях изотропная среда приобретает свойства одноосного кристалла с оптической осью, совпадающей с направлением векторов **E** или **H**.

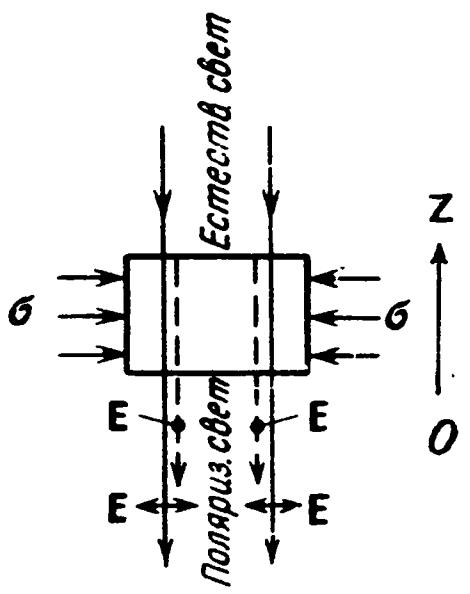


Рис. 4.30

Разность показателей преломления для волн обыкновенной и необыкновенной пропорциональна:
при фотоупругости — механическому напряжению σ_2;
при электрическом двойном лучепреломлении — E^2;
при магнитном двойном лучепреломлении — B^2.

Оптически активные вещества

При распространении света через некоторые вещества (кварц, раствор сахара в воде и др.) линейно поляризованного света происходит изменение положения плоскости поляризации. Это явление называется *вращением плоскости поляризации*, а вещества, в которых наблюдается это явление, называют-

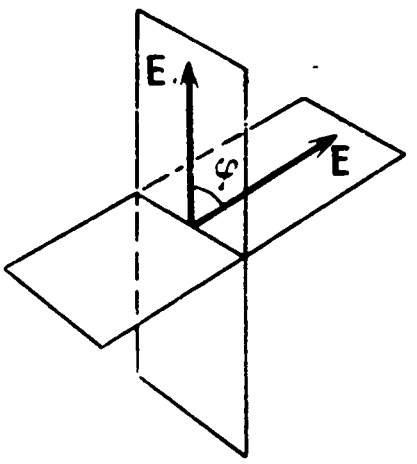


Рис. 4.31

ся *оптически активными*. Угол вращения плоскости поляризации чистыми веществами (рис. 4.31):

$$\varphi = \alpha l, \qquad (4.29)$$

l — толщина слоя, α — постоянная вращения, равная углу поворота плоскости поляризации слоем толщиной 1 м.

Угол вращения плоскости поляризации растворами

$$\varphi_p = [\alpha] l C, \qquad (4.30)$$

C — объемная концентрация, $[\alpha]$ — удельная постоянная вращения, равная углу поворота плоскости поляризации слоем раствора толщиною 1 м с объемной концентрацией 1 кг/м^3.

Давление света

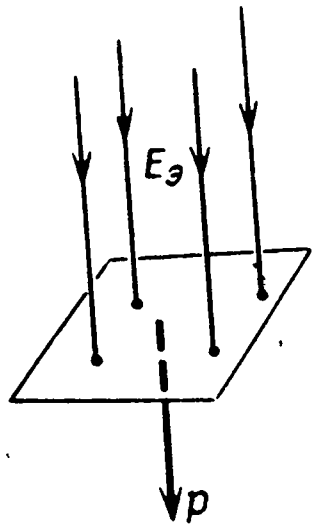


Рис. 4.32

Давление электромагнитных волн на плоскость, расположенную перпендикулярно направлению их распространения (рис. 4.32):

$$p = E_э (1 + \rho)/c, \qquad (4.31)$$

$E_э$ — энергетическая освещенность; c — скорость света в вакууме, ρ — коэффициент отражения (отношение потока энергии отраженных волн к потоку энергии падающих волн).

Давление излучения Солнца на земную поверхность в яркий день равно приблизительно 4 мкПа.

5. Квантовая оптика

Энергия любого вида электромагнитного излучения, в том числе и светового, состоит из дискретных порций, которые называются квантами излучения или фотонами.

Свойства света, обусловленные его квантовой природой, называются квантовыми (или корпускулярными).

Характеристики фотона

$\varepsilon = h\nu$ — энергия фотона монохроматического электромагнитного излучения частотою ν; h — постоянная Планка, равная $6{,}625 \cdot 10^{-34}$ Дж · с;
$m_ф = h\nu/c^2$ — масса фотона;
$p_ф = h\nu/c$ — импульс;
$M_ф = h/2\pi$ — момент импульса.

Фотоэффект

Электрические явления при освещении светом вещества:
— выход электронов из вещества (*внешний фотоэффект*);
— перемещение электронов и дырок через границу соприкосновения полупроводников *n*- и *p*-типа проводимости (*вентильный фотоэффект*);
— изменение электропроводности (*фотопроводимость*).

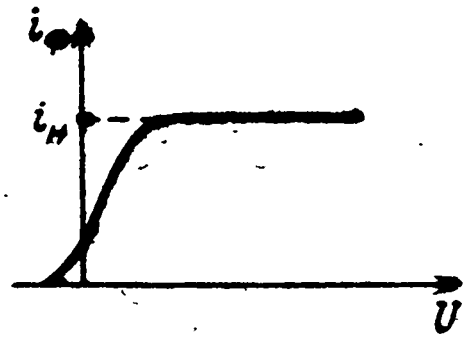


Рис. 4.33

Вольт-амперная характеристика внешнего фотоэффекта приведена на рис. 4.33.

Законы внешнего фотоэффекта

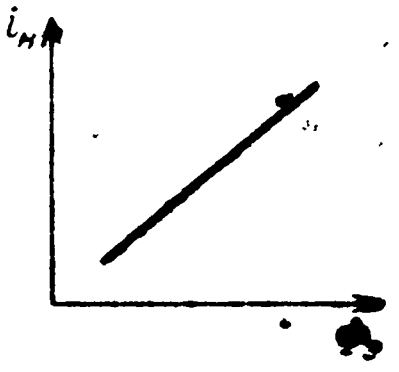


Рис. 4.34

1. *Закон Столетова*: фототок насыщения $i_н$ прямо пропорционален энергетическому потоку $Ф_э$ при его неизменном спектральном составе (рис. 4.34).
2. Наибольшая скорость $v_м$ фотоэлектронов не зависит от энергетической силы света; $v_м$ зависит от частоты электромагнитных волн.
3. Энергетический баланс определяется *уравнением Эйнштейна* (основное уравнение фотоэффекта):

$$h\nu = A + m_e v_м^2/2, \qquad (4.32)$$

A — работа выхода, m_e — масса электрона, $v_м$ — максимальная скорость электронов.
4. Существует красная граница фотоэффекта — наименьшая частота $\nu_к$, ниже которой фотоэффект не происходит (рис. 4.35); $\nu_к = A/h$.
5. Фотоэффект безынерционен.

Рис. 4.35

Спектр

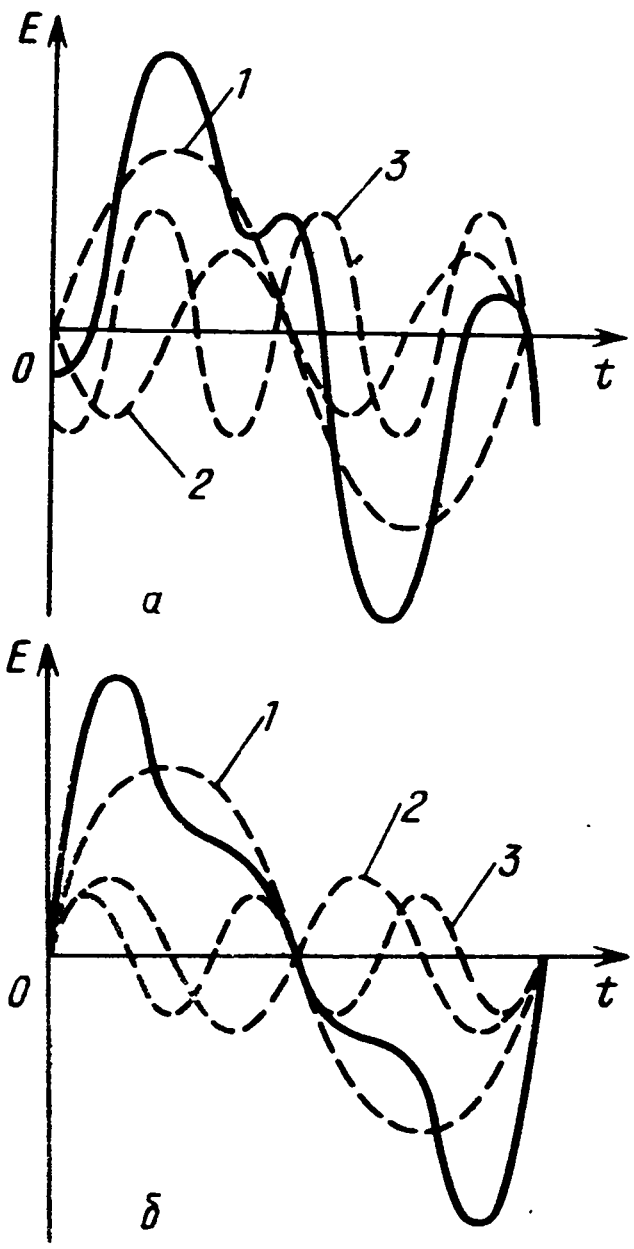


Рис. 4.36

Любое негармоническое колебание можно представить как результат сложения (суперпозицию) гармонических колебаний (кратко их называют гармониками) с различными амплитудами и частотами. Совокупность амплитуд и частот гармоник, из которых состоит сложное колебание (или волна), называется спектром амплитуд и частот или, кратко, *спектром*. Спектром (в узком смысле слова) иногда называют цветные полосы, получающиеся на экране в результате разделения параллельного пучка немонохроматического света призмой (или другим прибором) по направлениям, соответствующим различным длинам волн. На рис. 4.36 показан спектр негармонического колебания (сплошная линия), состоящий из трех первых гармоник (1-й, 2-й, 3-й — штриховые линии) с различными начальными фазами.

Спектр испускания

Совокупность частот (или длин волн) гармоник, из которых состоит излучение.

Сплошной спектр

Совокупность частот (или длин волн), непрерывно переходящих друг в друга. Например, излучение нагретых твердых тел и жидкостей имеет сплошной спектр.

Линейчатый спектр

Спектр, в котором поток излучения сосредоточен в узких пределах вблизи лишь некоторых длин волн, с интервалом не более 10 нм, а для иных длин волн поток равен нулю. Например, излучение невзаимодействующих атомов имеет линейча-

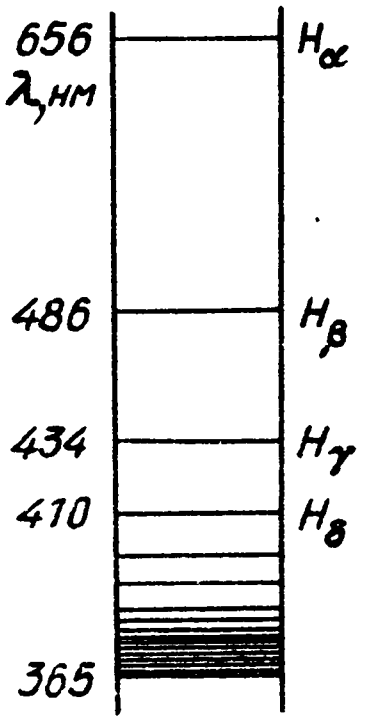


Рис. 4.37

тый спектр; линейчатый спектр, полученный с помощью спектроскопа в диапазоне длин волн 400—800 нм, представляется на экране (или на сетчатке глаза) тонкими цветными полосками. Количество линий и соответствующие им длины волн зависят от строения атомов.

На рис. 4.37 приводится линейчатый спектр водорода для видимого излучения; слева указаны длины волн, справа — обозначение линий спектра.

Полосатые спектры

Состоят из большого числа близко расположенных друг к другу линий, которые составляют отдельные широкие полосы (100 нм и больше). Полосатый спектр определяется строением молекул.

Спектр поглощения

Совокупность частот гармоник, которые поглощаются средой.

Спектральная линия поглощения

Спектр поглощения, занимающий узкий интервал, ширина которого меньше средней частоты интервала.

Закон Кирхгофа — Бунзена

Атомы поглощают гармоники таких частот, которые они излучают, будучи источниками света. Это явление называется обращением спектральных линий.

Линии Фраунгофера

Спектральные линии поглощения, наблюдаемые в спектре излучения Солнца, называются *линиями Фраунгофера*; они образуются вследствие поглощения атмосферой Солнца некоторых участков спектра излучения.

Тепловое излучение

Электромагнитное излучение, которое возбуждается тепловым движением атомов и молекул.

Спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность)

Отношение энергетической светимости $\Delta R_э$, которая соответствует малому интервалу волн $\Delta\lambda$ (или частот $\Delta\nu$), к ширине этого интервала:

$$E_{\lambda T}=\Delta R_э/\Delta\lambda, \quad E_{\nu T}=\Delta R_э/\Delta\nu.$$

Единицы: Вт/(м$^2\cdot$нм); Дж/м^2

Поглощательная способность

Отношение поглощенного потока излучения $\Delta\Phi_\lambda$, которому соответствует малый интервал волн $\Delta\lambda$, к падающему на это тело потоку $\Delta\Phi_\lambda$ с тем же самым интервалом длин волн $\Delta\lambda$ (или частот $\Delta\nu$):

$$A_\lambda=\Delta\Phi'_\lambda/\Delta\Phi_\lambda,$$

A_λ — величина безразмерная, изменяющаяся от 0 до 1.

Черное тело

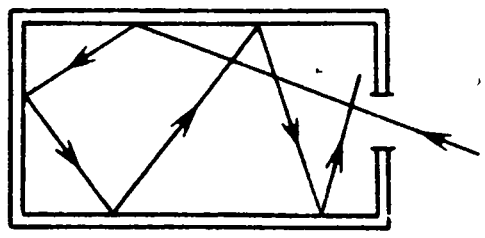


Рис 4 38

Тело, которое поглощает полностью падающее на него излучение независимо от направления, длины волны и поляризации, называется *черным телом* (или *полным излучателем*). Моделью такого тела может служить малое отверстие в стенке полого ящика (рис. 4.38). Для черного тела $A_\lambda=1$.

Закон Кирхгофа

$$\frac{E_{\lambda T}}{A_{\lambda T}}=\varepsilon_{\lambda T} \qquad (4.33)$$

Отношение спектральной плотности энергетической светимости теплового излучения любого тела данной длины волны и температуры к поглощательной способности этого же тела для той же длины волны и температуры является величиной постоянной Эта величина ($\varepsilon_{\lambda T}$) является универсальной фун-

кцией длины волны (или частоты) и температуры; она определяет излучательную способность черного тела.

На рис. 4.39 приводится распределение спектральной плотности энергетической светимости в спектре излучения черного тела; для построения использована косоугольная система координат с логарифмическими шкалами; по горизонтальной оси отложены длины волн, по наклонной оси — значения $\varepsilon_{\lambda T}$, цифры у кривых указывают температуру.

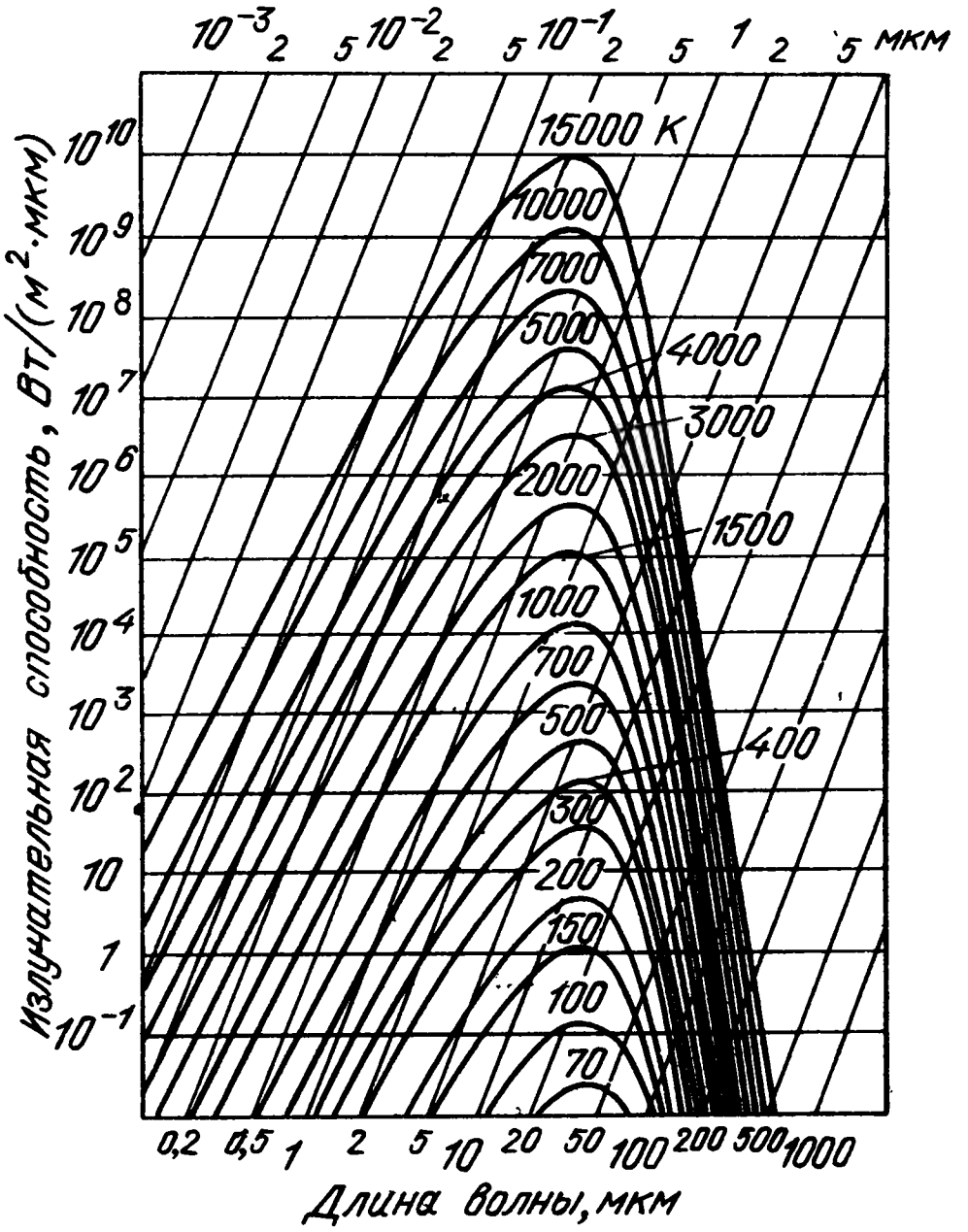


Рис. 4.39

Закон Стефана — Больцмана

$$R_э = \sigma T^4 \qquad (4.34)$$

Энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени температуры T.

$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2 \cdot$ К^4) — постоянная Стефана — Больцмана.

Закон смещения Вина

$$\lambda = \frac{b}{T} \qquad (4.35)$$

Длина волны $\lambda_м$, которой соответствует максимальная спектральная плотность энергетической светимости черного тела, обратно пропорциональна температуре T.
$b = 0{,}2829$ см $\cdot$ К — постоянная Вина.

Формула Планка

$$\varepsilon_{\lambda T} = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{hc/(k\lambda T)} - 1}, \qquad (4.36)$$

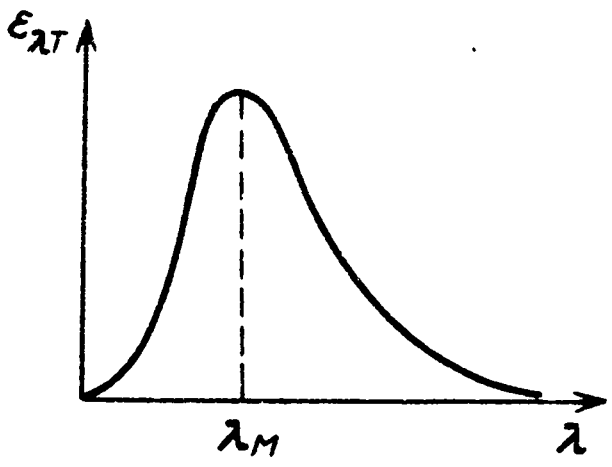


Рис. 4.40

$\varepsilon_{\lambda T}$ — спектральная плотность энергетической светимости черного тела (рис. 4.40); c — скорость света в вакууме, h — постоянная Планка, k — постоянная Больцмана, λ — длина волны.

Глава V

Строение атома и элементарные частицы

1. Единицы, используемые в атомной и ядерной физике

Физическая величина	Название единицы	Обозначение	Определение	Значение, ед. СИ
Масса	Атомная единица массы	а.е.м.	1/12 часть массы ядра изотопа углерода $=12$	$1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг
Энергия	Электрон-вольт	эВ	$A=QU(Q=e,$ $U=1$ В)	$1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж
Заряд	Элементарный заряд	e	Заряд электрона	$1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Момент импульса	—	$\hbar$	$\frac{h}{2\pi}=\hbar$	$1{,}055 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Магнитный момент электрона	Магнетон Бора	$\mu_Б$	$eh/(4\pi m_e)$, m_e — масса электрона	$9{,}274 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Магнитный момент ядра	Ядерный магнетон	μ_N	$eh/(4\pi m_p)$, m_p — масса протона	$5{,}051 \cdot 10^{-27}$ Дж/Тл

2. Волновые свойства частиц

Электромагнитное излучение имеет как волновые, так и корпускулярные свойства (корпускулярно-волновой дуализм). Движущиеся частицы обладают также корпускулярными и волновыми свойствами. Например, электроны, проходя через тонкую металлическую фольгу, дают дифракционную картину, подобную дифракционной картине от рентгеновских и γ-лучей.

Корпускулярные и волновые характеристики

$$\nu=E/h, \quad \omega=E/\hbar, \quad \lambda_д=h/p, \qquad (5.1)$$

ν — частота, E — энергия, ω — угловая частота, $\lambda_д$ — длина волны де Бройля, p — импульс частицы.

3. Строение атома

Модель Резерфорда — Бора — Зоммерфельда

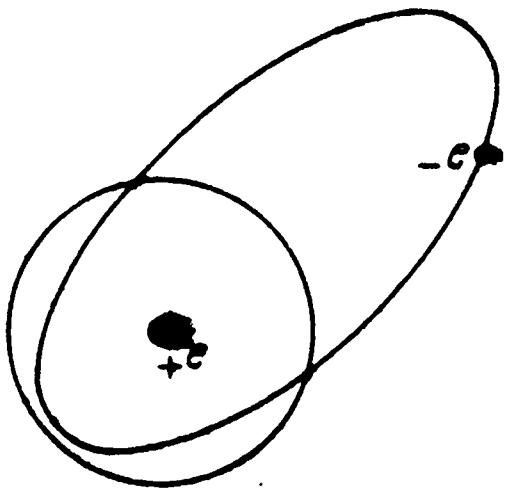


Рис. 5.1

В центре атома находится положительно заряженное ядро, вокруг которого по определенным круговым и эллиптическим орбитам вращаются электроны; при перемещении по таким орбитам (они называются стационарными) электроны не излучают электромагнитные волны, что противоречит законам электродинамики; каждой стационарной орбите соответствует определенное значение энергии атома (*первый постулат Бора*). Ядро находится в одном из фокусов эллиптической орбиты (или в центре круговой орбиты). Основная масса атома сосредоточена в ядре. Стационарные круговые орбиты атома водорода определяются соотношением

$$m_e v_n r_n = nh/(2\pi), \qquad (5.2)$$

m_e — масса электрона, v_n — его линейная скорость на стационарной орбите, r_n — радиус стационарной орбиты, h — постоянная Планка, $n = 1, 2, 3, \ldots$

Атом излучает или поглощает квант энергии при переходе из одного стационарного состояния в другое (*второй постулат Бора*):

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m, \qquad (5.3)$$

при этом электрон переходит с одной стационарной орбиты на другую.

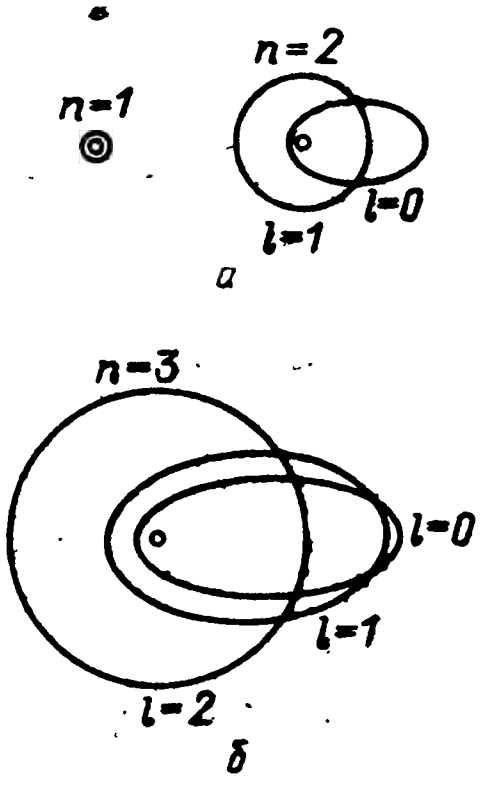


Рис. 5.2

Модель многоэлектронного атома

В центре атома находится положительно заряженное ядро, окруженное электронами, которые распределяются по оболочкам и подоболочкам (см. ниже). Заряд ядра

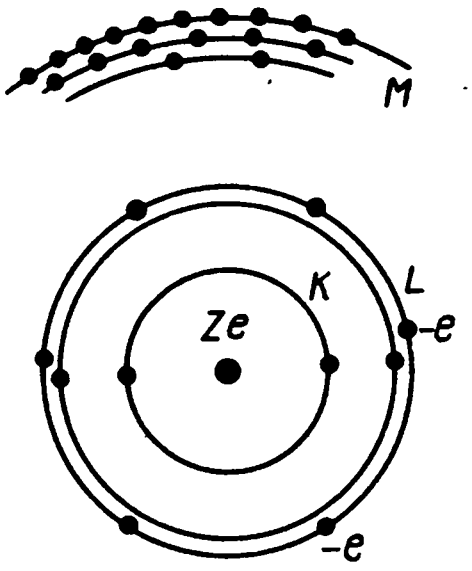


Рис. 5.3

(в элементарных зарядах e) равен порядковому номеру элемента (атомному номеру) Z в периодической системе Д. И. Менделеева; Z называется также *зарядовым числом*; количество электронов в нейтральном атоме равно Z.

Основная масса атома сосредоточена в ядре. Ядро самого легкого атома водорода состоит из одного протона. Масса протона $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг, масса электрона $m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг, $m_p = 1836\, m_e$.

Ионы

Атомы, у которых количество электронов не равно Z, называются *ионами*. У положительного иона электронов меньше, а у отрицательного иона больше по сравнению с количеством электронов в нейтральном атоме.

Энергия ионизации

Энергия, которая потребуется для отрыва электрона от ядра атома (без сообщения ему кинетической энергии).

Квантовые числа электронов

Энергетические уровни атома определяются квантовыми числами электронов.

1) Главное квантовое число $n = 1, 2, \ldots$

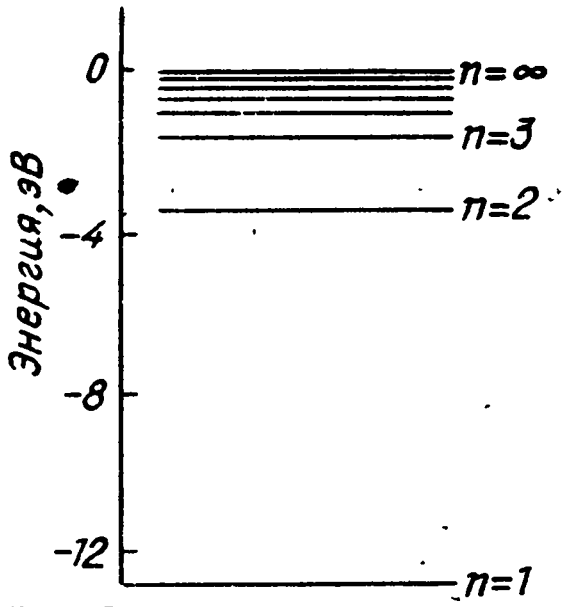


Рис. 5.4

Определяет в основном дискретные энергетические уровни. Например, для атомов водорода энергетические уровни рассчитываются по формуле

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2}, \qquad (5.4)$$

m_e — масса электрона, e — его заряд, $n = 1, 2, 3, \ldots$ — главное квантовое число, h — постоянная Планка. Энергетические уровни атома водорода приведены на рис. 5.4.

2) Орбитальное квантовое число $l=0, 1, ..., n-1$

Этим квантовым числом определяется орбитальный момент импульса электрона:

$$M_l=\hbar\sqrt{l(l+1)}. \quad (5.5)$$

3) Магнитное квантовое число $m_l=-l, ..., 0, ..., +l$

Определяет проекцию орбитального момента на выделенное (например, магнитным полем) направление:

$$M_{lz}=m_l\hbar. \quad (5.6)$$

Спиновое квантовое число $s=1/2$

Определяет собственный момент импульса (спин) электрона

$$M_s=\hbar\sqrt{s(s+1)} \quad (5.7)$$

и его проекцию

$$M_{sz}=\pm\frac{1}{2}\hbar. \quad (5.8)$$

Принцип Паули

Электроны, входящие в состав одного и того же атома, отличаются друг от друга хотя бы одним квантовым числом.

Электронные оболочки и подоболочки

Электроны в атоме с одинаковым главным квантовым числом n, но различными значениями других квантовых чисел образуют оболочку. Электроны в атоме с одинаковыми квантовыми числами n и l, но различными значениями m_l образуют подоболочку.

Оболочки обозначаются большими латинскими буквами K, L, M, N, . .; подоболочки обозначаются цифрой и малой латинской буквой, как указано в таблице.

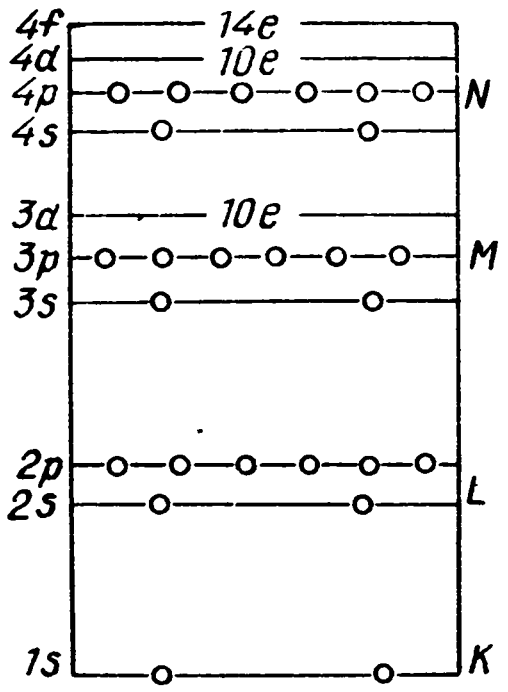


Рис. 5.5

Квантовое число n	1	2	3	4
Оболочка	K	L	M	N
Подоболочки	$1s$	$2s$, $2p$	$3s$, $3p$, $3d$	$4s$, $4p$, $4d$, $4f$

Буквы s, p, d, f, ... соответствуют состояниям с квантовыми числами $l=0, 1, 2, 3, 4, \ldots$ Порядок заполнения элементов в периодической системе элементов Д. И. Менделеева приводится в таблице 52 (см. Справочные таблицы).

Излучатсльные переходы

При переходах электронов с одних энергетических уровней на другие изменяются их квантовые числа. Как показывает теория и опыт, переход электрона возможен на такие уровни, когда изменение $\Delta m_l=0, \pm 1$, изменение $\Delta l=\mp 1$, при этом происходит либо излучение, либо поглощение фотона.

При переходах электронов между внешними оболочками образуется инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучение. Если из внутренней оболочки атома удалить электрон, то на эту оболочку будут самопроизвольно переходить электроны из других оболочек с бо́льшими значениями n. При таких переходах образуется коротковолновое электромагнитное излучение с линейчатым спектром (*характеристическое рентгеновское излучение*).

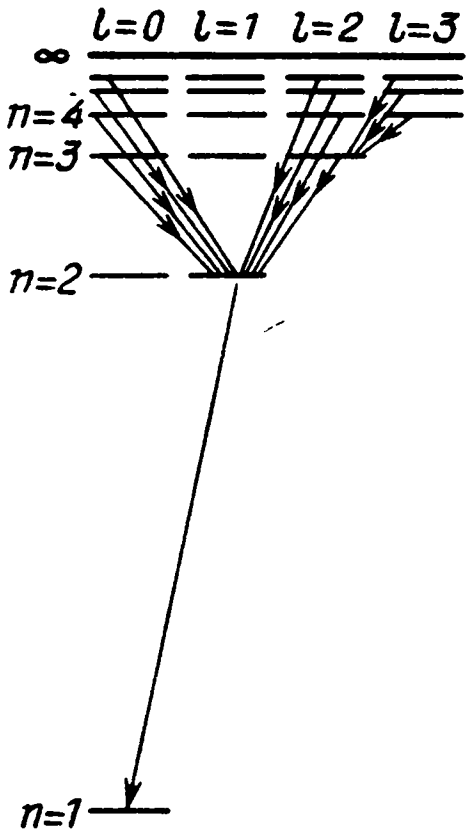


Рис. 5.6

Схема наиболее вероятных излучательных переходов в изолированном атоме водорода приведена на рис. 5.6. При таких переходах l изменяется на 1. Магнитный момент электрона изолированного атома водорода имеет произвольную ориентацию.

4. Атомное ядро

Нуклоны

Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов, которые можно рассматривать как два различных со

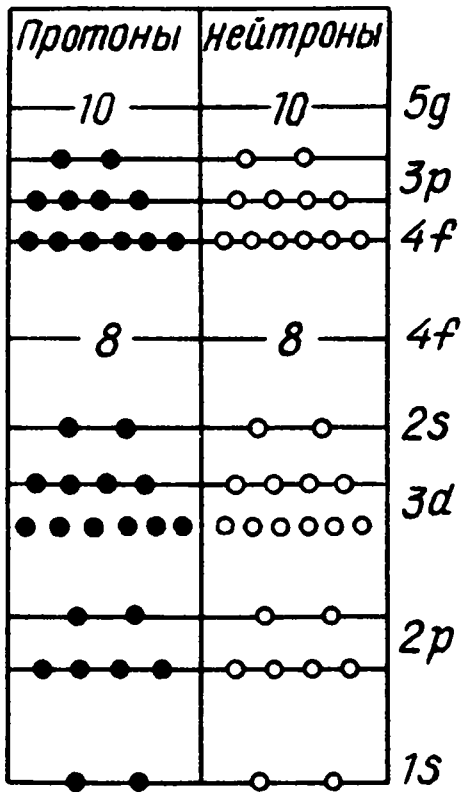


Рис. 5.7

стояния одной частицы — *нуклона*. Поэтому часто говорят, что ядро состоит из нуклонов, одна часть которых находится в протонном состоянии, другая — в нейтронном. Количество протонов равно порядковому номеру Z элемента в периодической системе; заряд ядра $Q_я = Ze$. Количество нуклонов в ядре называется *массовым числом* A. Количество нейтронов N в ядре равно разности $A - Z$. Нуклоны в ядре образуют оболочки, которые обозначаются так же как и электронные оболочки. На рис. 5.7 указано распределение протонов и нейтронов по ядерным оболочкам.

Символ ядра

$^{A}_{Z}\mathrm{Y}$ — ядро Y с зарядовым числом Z и массовым числом A.

Изотопы и изобары

Ядра с одинаковым количеством протонов и различным количеством нейтронов называются *изотопами*. Ядра с одинаковым количеством нуклонов, но различным количеством протонов называются *изобарами*.

Размер ядра и концентрация нуклонов

Размер ядра зависит от количества нуклонов, входящих в его состав; в нем отчетливо выделяются внутренняя область и поверхностный слой. Концентрация нуклонов во внутренней области приблизительно постоянна и для всех ядер с $A > 10$ равна $1{,}68 \cdot 10^{44}$ нуклон/м^3. В поверхностном слое, толщина которого почти одинакова для всех ядер и составляет $(1{,}5 \div 2) \times \times 10^{-15}$ м, концентрация нуклонов уменьшается до нуля.

От концентрации нуклонов зависит плотность электрического заряда.

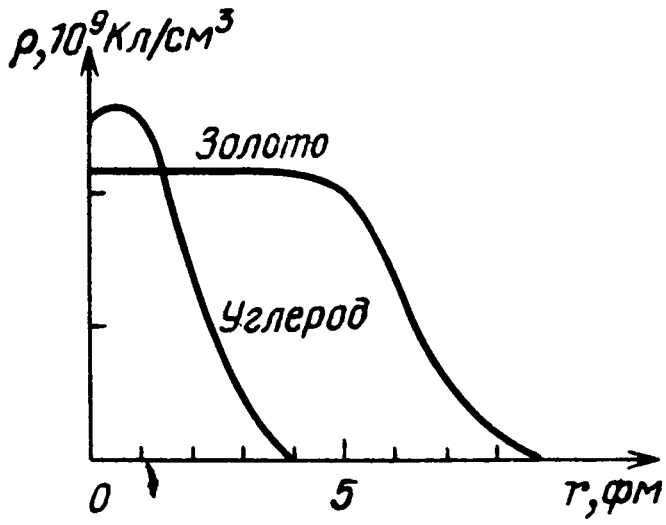


Рис. 5.8

Радиусом ядра принято считать расстояние от центра до слоя, в котором плотность заряда равна половине его максимального значения. Радиус ядра R увеличивается с ростом числа нуклонов; его приближенное значение рассчитывается по формуле

$$R = R_0 A^{1/3}, \qquad (5.9)$$

$R_0 = 1{,}2 \div 1{,}3 \cdot 10^{-15}$ м, A — массовое число.

На рис. 5.8 представлена зависимость плотности электрического заряда в ядре золота и углерода.

Ядерные силы

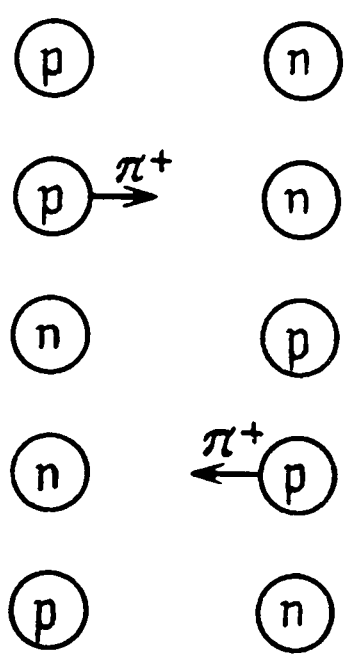


Рис. 5.9

Нуклоны внутри ядра связаны ядерными силами (см. фундаментальные взаимодействия), обусловленными обменом π-мезонами (рис. 5.9). Ядерные силы проявляются только на малых расстояниях, сравнимых с межнуклонными расстояниями в ядре (порядка 10^{-15} м). Они не зависят от электрического заряда нуклонов (*принцип зарядовой независимости*) и обладают свойством насыщения. Ядерные силы имеют три составляющие: центральную (*1*), зависящую от расстояния, спин-спиновую (*2*), которая зависит от ориентации спинов, и спин-орбитальную (*3*), которая зависит от ориентации спинов относительно прямой, соединяющей нуклоны. На рис. 5.10 графически изображены кривые зависимости потенциала составляющих ядерных сил при взаимодействии одинаковых нуклонов (протон — протон или нейтрон — нейтрон). Спин-спиновая и спин-орбитальная компоненты рассчитаны для случая, когда общий спин

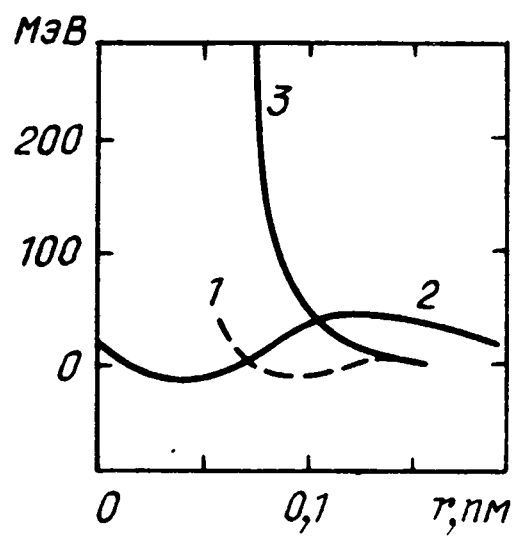


Рис. 5.10

нуклонов перпендикулярен прямой, соединяющей эти нуклоны.

Дефект масс

Масса ядра M всегда меньше суммы масс покоя нуклонов, из которых состоит ядро. Разность между суммой масс покоя нуклонов и массой ядра называется *дефектом масс*:

$$\Delta M = Zm_p + (A-Z)m_n - M. \qquad (5.10)$$

Дефектом масс определяется энергия связи нуклона, равная работе, которую необходимо совершить для удаления нуклона из ядра (без сообщения ему кинетической энергии).

Энергия связи

Энергией связи ядра называется величина, равная работе, которую необходимо совершить для расщепления ядра на невзаимодействующие между собой нуклоны, при этом их кинетическая энергия должна быть равной нулю.

Энергия связи ядра

$$\Delta E = \Delta M c^2. \qquad (5.11)$$

Энергия связи ядра приблизительно пропорциональна числу нуклонов в ядре.

Удельная энергия связи ядра

$$E_{уд} = \Delta E / A, \qquad (5.12)$$

A — массовое число, ΔE — энергия связи ядра. Зависимость $E_{уд}$ от A представлена на рис. 5.11.

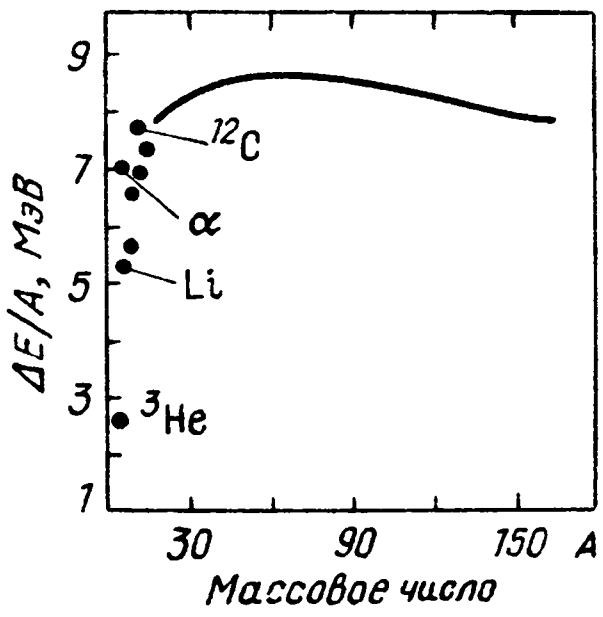


Рис. 5.11

5. Радиоактивные процессы

Тяжелые ядра в основном состоянии часто оказываются неустойчивыми и самопроизвольно распадаются, в результате чего образуются новые (дочерние) ядра и другие микрочастицы. Это свойство ядер называется *радиоактивностью*, а такие ядра называются *радиоактивными*.

α-распад	$^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$ Из радиоактивных ядер выбрасываются альфа-частицы (ядра гелия $^{4}_{2}\mathrm{He}$). Порядковый номер Z дочернего ядра уменьшается на 2, массовое число A уменьшается на 4.
β-распад	$^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{Y} + \mathrm{e}^{-} + \tilde{\nu}_{\mathrm{e}}$ Происходит излучение электронов и электронных антинейтрино, у дочернего ядра Z увеличивается на 1, A остается прежним.
β^{+}-распад	$^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y} + \mathrm{e}^{+} + \nu_{\mathrm{e}}$ Излучаются позитрон и электронное нейтрино, у дочернего ядра Z уменьшается на 1, A остается прежним.
K-захват	$^{A}_{Z}\mathrm{X} + \mathrm{e}^{-} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y} + \nu_{\mathrm{e}}$ С электронной оболочки K захватывается ядром электрон, при этом один из протонов ядра превращается в нейтрон, Z дочернего ядра уменьшается на 1, излучается электронное нейтрино и характеристическое рентгеновское излучение.
Гамма-излучение	$^{A}_{Z}\mathrm{X}^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + \gamma$ Возбужденное ядро X^{*} переходит в основное состояние, при этом излучается коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны $10^{-3} \div 10^{-4}$ нм.

Спонтанное деление ядер

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A_2}_{Z_2}Y + 2n,$$

Самопроизвольное деление ядер на две части, при этом излучается два — три нейтрона. Ядра урана и плутония делятся на два осколка с различными массами; по мере увеличения A массы образующихся при делении ядер становятся одинаковыми (например, у фермия-256).

Протонная радиоактивность

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-1}_{Z-1}Y + {}^{1}_{1}H$$

Выбрасываются из ядра протоны — ядра легкого изотопа водорода; в новом ядре Z уменьшается на 1, A также уменьшается на 1.

Законы радиоактивности

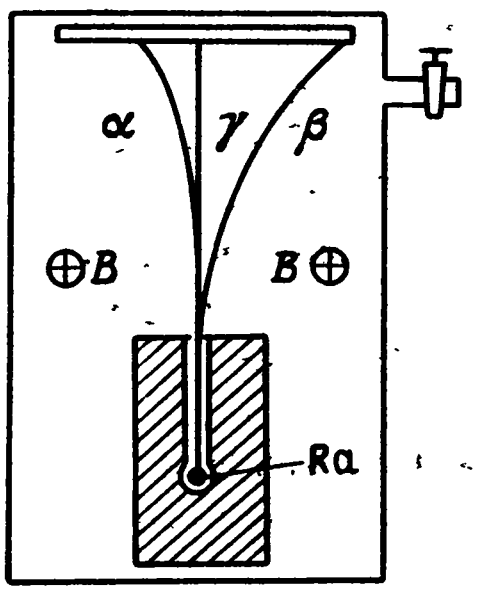


Рис. 5.12

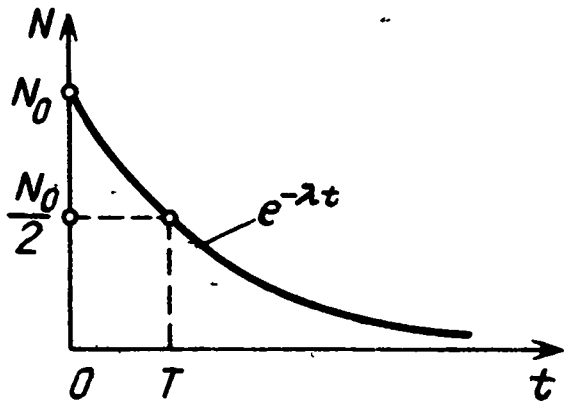


Рис. 5 13

1. Радиоактивный распад не зависит от внешних условий (температуры, давления, химических взаимодействий и т. п.).

2. α- и γ-частицы имеют дискретный энергетический спектр, энергии α-частиц изменяются в пределах от 0 до некоторого максимального значения.

3. Изменение количества радиоактивных ядер рассчитывается по формуле

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-t/T}, \qquad (5.13)$$

N_0 — количество ядер в момент времени $t=0$, N — количество ядер в момент времени t, T — *период полураспада* — время, в течение которого распадается половина ядер $(N/2)$; λ — вероятность распада одного ядра за время 1 с (постоянная распада);

$$\lambda = (\ln 2)/T. \qquad (5.14)$$

4. В результате радиоактивного распада образуются новые ядра с другими порядковыми номерами Z (за исключением γ-излучения).

6. Ядерные реакции

Сильное взаимодействие атомного ядра с элементарными частицами или другими ядрами, в результате которого происходит возбуждение или преобразование ядер, называется ядерной реакцией. Для того чтобы проходила ядерная реакция, необходимо сближение ядра и частицы на расстояния порядка 10^{-15} м, при которых проявляется сильное взаимодействие. С этой целью атомное ядро, как мишень, облучается потоком частиц с большой кинетической энергией.

Эффективное сечение ядерной реакции

$$\sigma = \frac{\Delta N}{N_0 n \, \Delta Z}, \qquad (5.15)$$

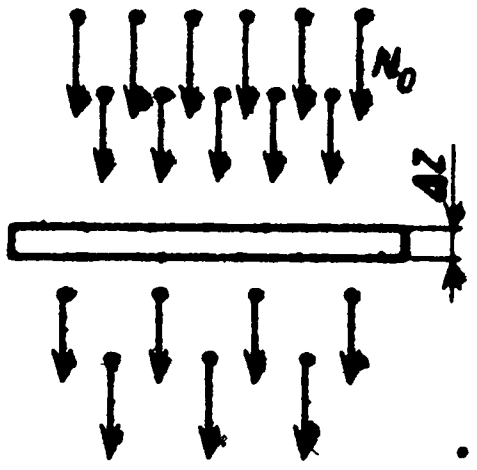


Рис. 5.14

ΔN — число частиц, вступивших в ядерную реакцию; N_0 — плотность потока в параллельном пучке частиц, облучающих мишень (количество частиц, проходящих за время 1 с через плоскость площадью 1 м^2); ΔZ — толщина мишени (достаточно малая), n — количество ядер мишени в объеме 1 м^3.

Единицы — квадратный метр, м^2; также применяется внесистемная единица 1 барн $= 10^{-28}$ м^2.

Энергия реакции — Освобождаемая при каждом акте ядерного взаимодействия энергия.

Энергетический порог реакции — Минимальная энергия облучающих мишень частиц, которая необходима для ядерного взаимодействия.

Законы сохранения — При ядерных реакциях выполняются законы сохранения:
1) заряда;
2) массы — энергии;
3) импульса;
4) момента импульса.

Кроме указанных законов сохранения должен выполняться закон сохранения барионных и лептонных чисел (см. п. 10 гл. V), а также другие специфические законы сохранения.

Получение нейтронов

$${}^{9}_{4}\mathrm{Be}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}\rightarrow{}^{12}_{6}\mathrm{C}+{}^{1}_{0}\mathrm{n}.$$

Обозначение: ${}^{9}_{4}\mathrm{Be}(\alpha, \mathrm{n}){}^{12}_{6}\mathrm{C}$.

Получение позитронов

$${}^{27}_{13}\mathrm{Al}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}\rightarrow{}^{30}_{15}\mathrm{P}+{}^{1}_{0}\mathrm{n},$$

$${}^{30}_{15}\mathrm{P}\rightarrow{}^{30}_{14}\mathrm{Si}+\beta^{+}+\nu_{e}.$$

Ядерный фотоэффект

$${}^{2}_{1}\mathrm{H}+\gamma\rightarrow{}^{1}_{0}\mathrm{n}+{}^{1}_{1}\mathrm{p}.$$

Детектор нейтронов

$${}^{10}_{5}\mathrm{B}+\mathrm{n}\rightarrow{}^{7}_{3}\mathrm{Li}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Обозначение: ${}^{10}_{5}\mathrm{B}(\mathrm{n}, \alpha){}^{7}_{3}\mathrm{Li}$.

Реакция аннигиляции

электрона — позитрона: $\beta^{-}+\beta^{+}\rightarrow 2\gamma$; протона — антипротона: $\mathrm{p}+\tilde{\mathrm{p}}\rightarrow\pi^{+}+\pi^{+}+\pi^{-}+\pi^{-}+\pi^{0}$.

Термоядерная реакция

Синтез легких ядер при высоких (порядка $10^{7}\div 10^{8}$ К) температурах:

$${}^{2}_{1}\mathrm{d}+{}^{3}_{1}\mathrm{t}\rightarrow{}^{4}_{2}\mathrm{He}+{}^{1}_{0}\mathrm{n}.$$

Энергетический эффект составляет 17,8 МэВ.

Деление тяжелых ядер

$${}^{235}_{92}\mathrm{U}+{}^{1}_{0}\mathrm{n}\rightarrow{}^{236}_{92}\mathrm{U}\rightarrow{}^{96}_{36}\mathrm{X}+{}^{140}_{56}\mathrm{Y}.$$

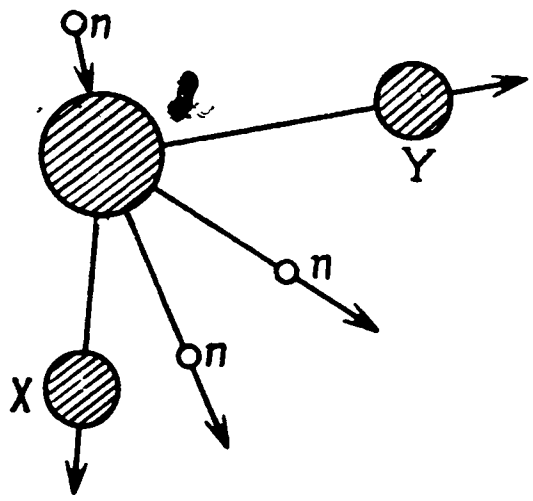


Рис. 5.15

Образующиеся осколки ядер, обозначенные условно X и Y, выбрасывают один — два нейтрона; небольшое количество нейтронов образуется при делении ядра. Энергетический эффект на один нуклон составляет около 0,8 МэВ.

Электронный захват

Из оболочки K (реже из оболочек L, M) захватывается один электрон; внутри ядра происходит реакция

$$\mathrm{p}+\beta^{-}\rightarrow\mathrm{n}+\nu.$$

Гамма-распад

Ядро возбуждается бомбардировкой частицами и фотонами; при

переходе в основное состояние излучается гамма-квант

$${}^{A}_{Z}Y^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}Y + \gamma.$$

7. Взаимодействие ядерных излучений с веществом

При движении частиц в веществе происходит поглощение их энергии за счет взаимодействия с электронными оболочками и ядрами атомов, при этом происходит рассеяние частиц, а также ионизация или возбуждение атомов вещества.

Торможение легких частиц

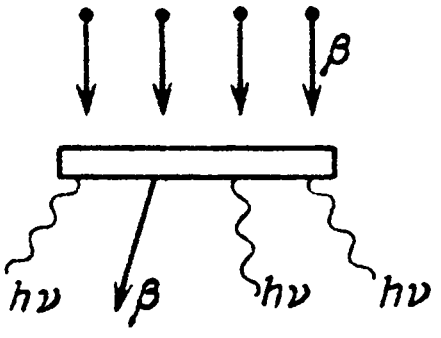


Рис 5.16

При взаимодействии электронов и позитронов с ядрами происходит их торможение, сопровождаемое электромагнитным излучением, которое называется *тормозным*; оно имеет сплошной спектр. При торможении быстрых электронов образуется *рентгеновское излучение*. Общие потери энергии за счет излучения при торможении частиц называются *радиационными*. Если энергия частицы достаточна для выбивания электронов из внутренних слоев оболочки атома, то возникает характеристическое рентгеновское излучение с линейчатым спектром. При движении электронов в веществе со скоростями, превышающими фазовую скорость света в нем (т. е. когда $v > c/n$, n – показатель преломления вещества), возникает *излучение Вавилова — Черенкова*. Часть этого излучения находится в диапазоне видимого излучения и имеет сплошной спектр, но основная доля его приходится на ультрафиолетовое излучение.

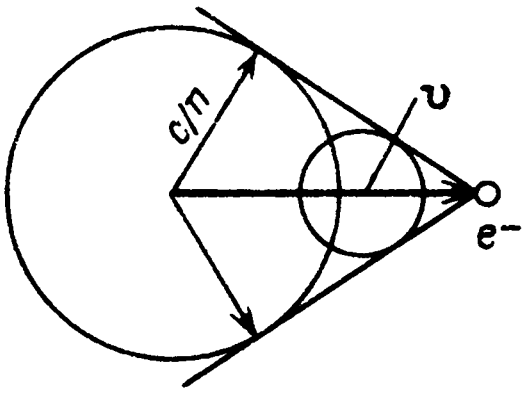


Рис. 5.17

Ослабление потока электронов

Параллельный пучок электронов, имеющих одинаковую энергию, в результате взаимодействия с веществом превращается в расходя-

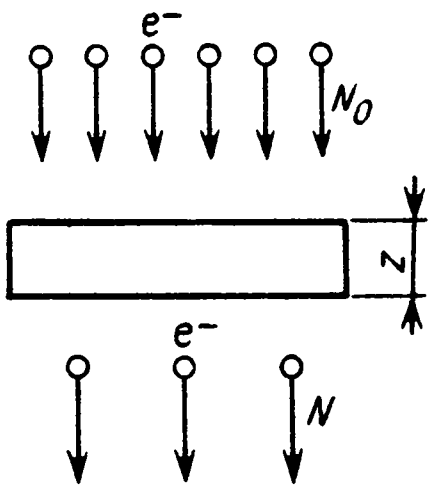


Рис. 5.18

щийся поток электронов, которые имеют различные энергии. Часть электронов поглощается веществом. Ослабление потока электронов рассчитывается по формуле

$$N = N_0 e^{-\mu z} = N_0 e^{-\mu' \rho z}, \qquad (5.16)$$

N_0 — поток входящих электронов, N — поток выходящих электронов, z — толщина слоя, μ — линейный коэффициент ослабления, равный $1/z_0$ (z_0 — расстояние, на котором поток ослабляется в e раз), $\mu' = \mu/\rho$ — массовый коэффициент ослабления (ρ — плотность вещества мишени); μ' имеет приблизительно одинаковые значения во всех веществах.

Торможение нуклонов и ядер

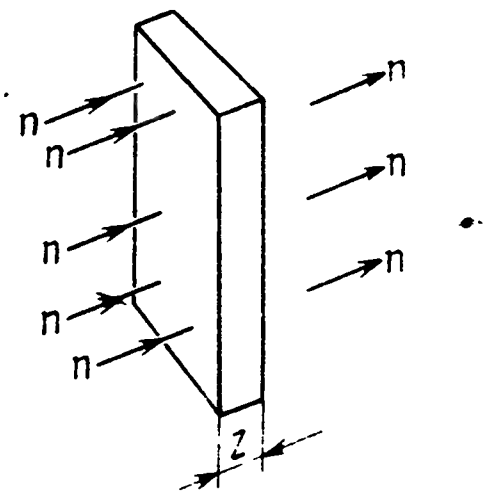


Рис. 5.19

Главную роль в торможении играют ионизационные потери, которые зависят от заряда и скорости частиц.

Параллельный пучок ядер или нуклонов, проходя через вещество, практически не рассеивается. Некоторая часть электронов, выбитых частицами из оболочек атомов, имеет энергию, достаточную для ионизации (вторичная ионизация). Вторичная ионизация, как правило, превышает первичную.

Длина среднего пробега

Среднее расстояние, которое проходит ядро в веществе.

Длина среднего пробега α-частиц (в метрах) в воздухе при нормальных условиях рассчитывается по формуле:

$$R_B = 3{,}18 \cdot 10^{-3} E^{3/2},$$

E — энергия в пределах от 4 до 7 МэВ.

Поглощение γ-излучения

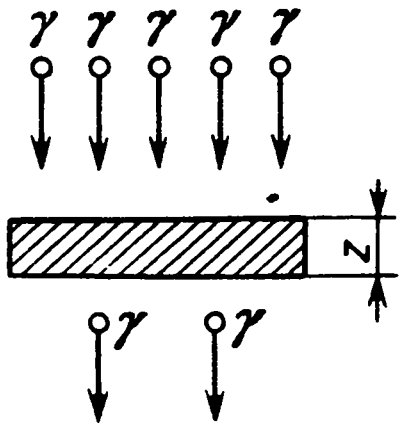


Рис. 5.20

Ослабление потока γ-излучения рассчитывается по формуле

$$I = I_0 e^{-\mu z} = I_0 e^{-\mu' \rho z}, \qquad (5.17)$$

I — поток на выходе из мишени, I_0 — поток на входе в мишень, μ — линейный коэффициент ослабления, $\mu' = \mu/\rho$ — массовый коэффициент ослабления (см. выше)

$$\mu = \sigma + \tau + \varkappa,$$

σ, τ, $\varkappa$ — линейные коэффициенты ослабления, учитывающие рассеяние, поглощение энергии при фотоэффекте, а также при образовании электронов и позитронов.

8. Единицы радиоактивности и ионизирующих излучений

Активность радиоактивного источника

Количество распавшихся ядер за время 1 с:

$$A = \Delta N / \Delta t, \qquad (5.18)$$

ΔN — количество распавшихся ядер за время Δt.
Единица: беккерель, Бк.
Беккерель равен активности источника, в котором за время 1 с происходит 1 распад.

Поглощенная доза излучения

Энергия, поглощаемая массой 1 кг данного вещества.
Единица: грэй, Гр.
1 грэй равен такой поглощенной дозе излучения, при которой вещество массой 1 кг поглощает энергию 1 джоуль.

Мощность поглощенной дозы

Поглощенная доза излучения за время 1 с.
Единица: грэй в секунду, Гр/с.

Коэффициент качества

При одинаковых поглощенных дозах различные виды излучения про-

изводят различные биологические воздействия на живые организмы. Коэффициент, показывающий, во сколько раз радиационная опасность данного излучения больше по сравнению с рентгеновским излучением при одинаковых поглощенных дозах, называется *коэффициентом качества излучения*.

Вид излучения	Q
Рентгеновское и гамма-излучение	1
Электроны, позитроны, бета-излучение	1
Протоны с энергией меньше 10 МэВ	10
Нейтроны с энергией меньше 20 кэВ	3
Нейтроны с энергией 0,1—10 МэВ	10
Альфа-излучение (с энергией меньше 10 МэВ)	20
Тяжелые ядра	20

Эквивалентная доза излучения $H = DQ$. (5.19)

Q — коэффициент качества, D — поглощенная доза излучения.

Единица: зиверт, Зв.

1 зиверт — поглощенная доза излучения при коэффициенте качества излучения $Q = 1$.

Используется внесистемная единица: 1 бэр = 0,01 зиверт.

9. Фундаментальные взаимодействия

Изучаемые в физике взаимодействия можно свести к четырем фундаментальным взаимодействиям: сильному, электромагнитному, слабому, гравитационному.

Сильное взаимодействие

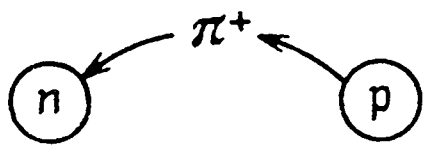


Рис. 5.21

К сильному взаимодействию относятся ядерные силы, которые при не слишком высоких температурах обеспечивают прочные связи между нуклонами; эти связи вызваны обменом π-мезонами — частицами с массою покоя около 300 МэВ

(п. 10 гл. V). Истинно сильным взаимодействием является взаимодействие между кварками посредством обмена глюонами (см. таблицу ниже).

Электромагнитное взаимодействие

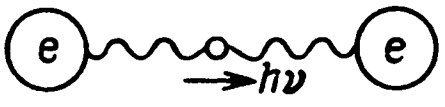


Рис. 5.22

Взаимодействие заряженных частиц посредством электромагнитного поля; оно обусловлено обменом фотонами.

Слабое взаимодействие

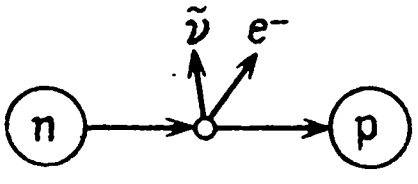


Рис. 5.23

Оно свойственно всем частицам и обусловлено обменом промежуточными бозонами; примером является β-распад.

Гравитационное взаимодействие

Рис. 5.24

Примером является гравитационное взаимодействие между телами (см. гл. I п. 18); оно объясняется обменом гравитонами. Основные характеристики фундаментальных взаимодействий приводятся в таблице.

Основные характеристики взаимодействий	Сильного	Электромагнитного	Слабого	Гравитационного
Радиус взаимодействий, м	10^{-15}	∞	10^{-17}	∞
Интенсивность	1	1/137	10^{-10}	10^{-19}
Частицы, обуславливающие взаимодействие	Глюоны, π-мезоны	Фотоны	Бозоны (промежуточные)	Гравитоны (?)
Массы покоя частиц, mc^2	глюона-0 π-мезона ~ ~300 МэВ	0	100 ГэВ	0
Спин частиц	$\hbar$	$\hbar$	$\hbar$	$2\hbar$
Время жизни, с (характерное время)	10^{-23}	10^{-20}	10^{-10}	Неизвестно

10. Элементарные частицы и их классификация

Элементарные в точном смысле этого слова — это первичные, неразложимые частицы, из которых построены все вещества.
В настоящее время этот термин применяется для обозначения большой группы микрочастиц, которые не являются атомами или их ядрами. Исключение представляет протон, который является и элементарной частицей, и ядром легкого изотопа водорода.

Частицы и античастицы

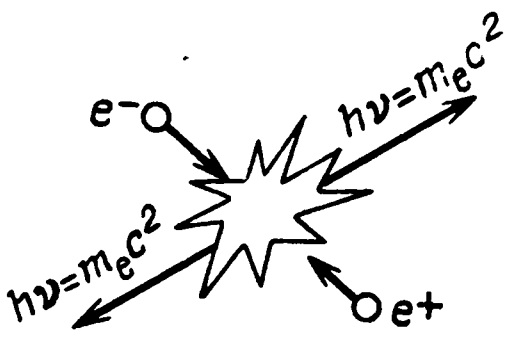


Рис. 5.25

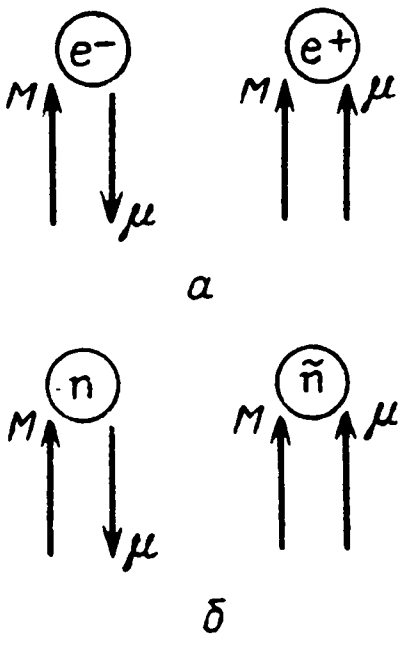


Рис. 5.26

Большинство элементарных частиц существует в двух разновидностях. Одну из них, чаще всего встречающуюся в окружающем нас мире, называют *частицей*, вторую — ее *античастицей*. Основной отличительной особенностью пары частица — античастица является реакция аннигиляции (исчезновения) — реакция превращения их в другие формы материи (рис. 5.25).
Частица и ее античастица имеют одинаковые массы, спины, времена жизни и равные по модулю электрические заряды; однако направления спиновых и магнитных моментов, знаки электрических зарядов, а также барионных и лептонных чисел противоположны (рис. 5.26).

Бозоны и фермионы

Собственный момент импульса частицы (спин) может быть целым или полуцелым (в единицах $\hbar$). Частицы, которые имеют спины, равные 0, $\hbar$, $2\hbar$ и т. д., называются *бозонами*; частицы с полуцелым спином называются *фермионами*.

Адроны: нуклоны, гипероны, π-мезоны

По видам взаимодействий, в которых участвуют частицы, их подразделяют на четыре класса. К насто-

ящему времени экспериментально подтверждено существование только трех классов. К первому классу частиц, получивших название адронов, относятся частицы, участвующие во всех видах фундаментальных взаимодействий. В этот класс объединяются барионы и мезоны. Барионы имеют полуцелые спины, а мезоны — целочисленные спины. Принадлежность к барионам отмечается присвоением барионного «заряда» (числа), равного $+1$ для частицы и -1 для античастицы. Для мезонов барионный заряд равен нулю.

К барионам относятся нуклоны и более тяжелые частицы, распадающиеся на нуклоны. Тяжелые барионы, массы которых больше массы нуклона, называются гиперонами.

Лептоны: электроны, позитроны, μ-мезоны, нейтрино	Во второй класс объединяются частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях, но способные к трем остальным; они называются лептонами. Принадлежность к этому классу частиц отмечается присвоением каждому члену лептонного «заряда» (числа) — для частиц $+1$, для античастиц -1.
Фотоны	К третьему классу частиц, участвующих в электромагнитных и гравитационных взаимодействиях, относятся фотоны.
Гравитоны	Существование гравитонов экспериментально не подтверждено.

11. Основные характеристики элементарных частиц

Q — заряд, m_0 — масса покоя, J — спин, B — барионное число, S — странность, τ — среднее время жизни.

Частица, символ	Q, e	m_0, МэВ	J, $\hbar$	B	S	Среднее время жизни τ, с	Типичные продукты распада
Гипероны:							
кси-минус-гиперон, Ξ^-	-1	1319	1/2	$+1$	-2	$2\cdot10^{-10}$	$\pi^- + \Lambda$
кси-нуль-гиперон, Ξ^0	0	1311	1/2	$+1$	-2	$2\cdot10^{-10}$	$\pi^0 + \Lambda$
сигма-минус-гиперон, $\sum^-$	-1	1196	1/2	$+1$	-1	$1{,}6\cdot10^{-10}$	$\pi^- + n$
сигма-нуль-гиперон, $\sum^0$	0	1192	1/2	$+1$	-1	10^{-20}	$\nu + \Lambda$
сигма-плюс-гиперон, $\sum^+$	$+1$	1190	1/2	$+1$	-1	$0{,}8\cdot10^{-10}$	$\pi^+ + n$ $\pi^0 + p$
ламбда-гиперон, Λ	0	1115	1/2	$+1$	-1	$1{,}5\cdot10^{-10}$	$\pi^- + p$
Нуклоны:							
нейтрон, n	0	940	1/2	$+1$	0	$1{,}0\cdot10^{3}$	$e^- + \nu + p$
протон, p	$+1$	938	1/2	$+1$	0	Стабилен	
Мезоны:							
ка-нуль-мезон, K^0	0	498	0	0	$+1$	$1\cdot10^{-10}$ или $6\cdot10^{-8}$	$\pi^+ + \pi^-$ $\pi^0 + \pi^0$ $\pi^+ + \mu^- + \tilde{\nu}$
ка-плюс-мезон, K^+	$+1$	494	0	0	$+1$	$1{,}2\cdot10^{-8}$	$\mu^+ + \nu$ $\pi + \pi^0$
пи-плюс-мезон, π^+	$+1$	140	0	0	0	$2{,}6\cdot10^{-8}$	$\mu^+ + \nu$
пи-нуль-мезон, π^0	0	135	0	0	0	$8\cdot10^{-17}$	$\gamma + \gamma$
Фотон	0	0	1	0	0	Стабилен	
Лептоны:							
мю-минус-мезон, μ^-	-1	106	1/2	0	—	$2{,}26\cdot10^{-6}$	$e^- + \nu + \tilde{\nu}$
электрон, e^-	-1	0,511	1/2	0	—	Стабилен	
нейтрино, ν	0	0	1/2	0	—	»	

12. Кварки и структура адронов

Свойства адронов и их превращения можно объяснить, если допустить, что они состоят из более «элементарных» частиц, которые называются *кварками*.

К настоящему времени известны шесть сортов («ароматов») кварков (u, d, s, c, b, t), каждый из которых существует в трех «цветовых» разновидностях («желтый», «синий», «красный»). Кварки имеют полуцелый спин. Свойства, которыми наделены кварки, необычны. Допускается возможность существования дробного электрического заряда и барионного числа.

Характеристики	Кварки					
	u	d	s	c	b	t
Электрический заряд, e	2/3	−1/3	−1/3	2/3	−1/3	2/3
Барионное число B	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Спин, $\hbar$	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2

Кроме указанных характеристик кварки отличаются квантовыми числами, которые называются «очарованием»; кварк c имеет очарование $+1$, остальные — нуль.

Структура барионов (предполагаемая)

Барион состоит из трех кварков, следовательно, барионное число $B=1$. Электрический заряд барионов определяется суммарным электрическим зарядом входящих в его состав кварков. Барионное число мезонов $B=0$, поэтому они образуются из пары кварк — антикварк.

Структура нуклонов (предполагаемая)

Нуклоны	Состав	Электрические заряды кварков, e	Ориентация спинов
Протон	u u d	2/3, 2/3, −1/3	↑↓↑
Нейтрон	u d d	2/3, −1/3, −1/3	↑↓↓

Справочные таблицы

Таблица 1. **Кинематические параметры планет**

Период обращения вокруг Солнца T_C, период обращения вокруг оси T_0, орбитальная скорость v_0, скорость освобождения v

Планеты	T_C, г	T_0	v_0, км/с	v, км/с
Меркурий	0,241	59 сут.	48,8	4,3
Венера	0,615	243 сут.	35,0	10,3
Земля	1,00004	23 ч 56 мин 4 с	29,8	11,16
Марс	1,881	24 ч 37 мин 22 с	24,2	5,0
Юпитер	11,86	9 ч 51 мин	13,06	57,5
Сатурн	29,46	10 ч 14 мин	9,65	37
Уран	84,01	10 ч 49 мин	6,78	22
Нептун	164,8	15 ч 40 мин	5,42	25
Плутон	250,6	6,4 сут.	4,75	10
Луна	(Спутник Земли)	24 сут. 7 ч 43 мин 11 с	1,02	2,37

Таблица 2. **Первая и вторая космические скорости на различных высотах H**

H, 10^3 км	v_1, км/с	v_2, км/с	H, 10^3 км	v_1, км/с	v_2, км/с	H, 10^3 км	v_1, км/с	v_2, км/с
0	7,9	11,19	5	5,92	8,37	30	3,31	4,68
0,5	7,62	10,77	10	4,93	6,98	40	2,94	4,15
1	7,35	10,40	20	3,89	5,50	50	2,66	3,76
2	6,90	9,76						

Таблица 3. **Периоды обращения T спутников Земли**

H — средняя высота обращения

H, км	T, ч	H, км	T, ч	H, км	T, ч
0	1,41	1000	1,75	5000	3,35
250	1,49	1500	1,93	10000	5,78
500	1,58	1690	2,00	35800*	23,935
750	1,68	2000	2,12		

*) Высота, на которой орбитальная угловая скорость спутника равна угловой скорости точек поверхности Земли; в этом случае спутник находится над одной и той же точкой земной поверхности.

Таблица 4. **Динамические характеристики планет Солнечной системы**

Расстояние от Солнца D, экваториальный радиус планеты R, плотность вещества планеты ρ, ускорение свободного падения g на поверхности планеты, масса M

Небесное тело	D, 10^{10} м	R, 10^6 м	ρ, 10^3 кг/м^3	g, м/с^2	M, 10^{24} кг
Солнце	—	696	1,41	274	$1{,}99 \cdot 10^6$
Меркурий	5,79	2,43	5,59	3,72	0,33
Венера	10,8	6,05	5,22	8,69	4,87
Земля	14,96	6,378	5,52	9,78	5,976
Марс	22,8	3,39	3,97	3,72	0,645
Юпитер	77,8	70,85	1,30	23,01	1899,3
Сатурн	142,7	60,1	0,71	9,44	568,4
Уран	286,9	24,6	1,47	9,67	86,8
Нептун	449,7	23,5	2,27	15,0	103
Плутон	594,7	2,2	10,4	8,0	1,1
Луна	0,03844 (от Земли)	1,737	3,34	1,62	0,0735

Таблица 5. **Напряженность земного поля тяготения (ускорение свободного падения) на уровне моря**

Широта	g, м/с^2	Широта	g, м/с^2
0°	9,78030	55,45° (Москва)	9,81523
10°	9,78186	59,57° (Ленинград)	9,81908
20°	9,78634	60°	9,81914
30°	9,79321	70°	9,82606
40°	9,80166	80°	9,83058
50°	9,81066	90°	9,83216

Таблица 6. **Плотности, модули упругости и коэффициенты Пуассона**

ρ — плотность, E — модуль Юнга, C — модуль сдвига, ν — коэффициент Пуассона

Материал	ρ, 10^3 кг/м^3	E, 10^9 Па	C, 10^9 Па	ν
Алюминий	2,7	63—70	25—26	0,32—0,36
Бетон	2,2	15—40	7—17	0,1—0,15
Висмут	9,8	32	12	0,33
Гранит, мрамор	2,8	35—50	14—44	0,1—0,15
Дюралюминий	2,79	70	26	0,34
Инвар	8,7	135	55	0,25
Каучук (натур.)	0,9	0,008	0,003	0,46
Кварц (нить)	2,65	73	31	0,17
Константан		160	61	0,33
Латунь	8,6	89—97	34—36	0,32—0,42
Медь	8,7—8,9	82—127	45	0,35

Продолжение

Материал	ρ, 10^3 кг/м^3	E, 10^9 Па	C, 10^9 Па	ν
Никель	8,9	204	79	0,28
Плексиглас	1,18	5,25	1,48	0,35
Резина	1,2	$(1,5-5)\cdot 10^{-3}$	$(5-15)\cdot 10^{-4}$	0,46—0,49
Свинец	11,3	16	5,7	0,44
Серебро	10,5	82,7	30	0,37
Сталь	7,7—7,9	195—205	80	0,25—0,30
Стекло	2,2—2,5	49—78	17,5—29	0,2—0,3
Титан	4,5	116	44	0,32
Чугун	7,8	100—150	44	0,23—0,27

Таблица 7. **Плотность воды и ртути при различных температурах**

t, °C	ρ, 10^3 кг/м^3	t, °C	ρ, 10^3 кг/м^3	t, °C	ρ, 10^3 кг/м^3	t, °C	ρ, 10^3 кг/м^3
а) *Плотность воды*							
−10	0,99815	6	0,99997	50	0,98807	250	0,794
− 5	0,99930	7	0,99993	60	0,98824	300	0,710
0	0,99987	8	0,99988	70	0,97781	350	0,574
1	0,99993	9	0,99981	80	0,97183	374,15*)	0,307
2	0,99997	10	0,99973	90	0,96534		
3	0,99999	20	0,99823	100	0,95838		
4	1,00000	30	0,99567	150	0,9173		
5	0,99999	40	0,99224	200	0,8690		
б) *Плотность ртути (при нормальном давлении)*							
0	13,5951	25	13,5335	50	13,4723	75	13,4116
5	13,5827	30	13,5212	55	13,4601	80	13,3995
10	13,5704	35	13,5090	60	13,4480	90	13,3753
15	13,5580	40	13,4967	65	13,4358	100	13,3514
20	13,5457	45	13,4845	70	13,4237	300	12,875

*) Критическая температура.

Таблица 8. **Плотность газов при 0 °C и нормальном давлении**

Вещество	ρ, кг/м^3	Вещество	ρ, кг/м^3
Азот	1,251	Неон	0,900
Аммиак	0,771	Озон	2,139
Аргон	1,783	Окись углерода	1,25

Таблица 9. **Коэффициенты трения**

Соприкасающиеся поверхности	Трение покоя f_0	Трение скольжения, f		
		сухое	со смазкой	с водяной смазкой
Сталь — сталь	0,15	0,1	0,01	—
Металл — дерево	0,5—0,6	0,4—0,5	0,03—0,08	0.25
Дерево — дерево	0,6—0,7	0,3	0,1	—
Кожа — чугун	0,5—0,6	0,2—0,3	0,12	0,28
Кожа — дерево	0,4—0,5	0,2—0,3	—	—
Сталь — лед	—	—	—	0.014
Шина автомобиля — асфальт	0,55	0,3	0,15	—

Коэффициенты трения качения $f_к$ (см):

металлического диска по металлу	0,001—0,002
колеса со стальным бандажем по стальному рельсу	0,005
шины автомобиля по асфальту (скорость 80 км/ч)	0,02

Коэффициент сцепления шины автомобиля ψ:

на сухом асфальте	0,7—0,8
на мокром асфальте	0,1—0,2
на сухом бетоне	0,9—1,0
на мокром бетоне	0,8—0,9
на сухой грунтовой дороге	0,4—0,5
на мокрой грунтовой дороге	0,3—0,4

Таблица 10. **Коэффициенты отражения звуковых волн полированными поверхностями металлов при нормальном падении, %**

Материал	Алюминий	Вода	Медь	Никель	Ртуть	Сталь	Стекло
Алюминий	0	72	18	24	1	21	2
Вода		0	87	89	75	88	65
Медь			0	0,8	13	0,3	19
Никель				0	19	0,2	34
Ртуть					0	16	4
Сталь						0	31
Стекло							0

Примечание. Коэффициенты отражения при переходе из одной среды в другую и обратно будут иметь одинаковые значения.

Таблица 11. **Коэффициент поглощения звука в воздухе α, 10^{-2} м$^{-1}$ при 20 °С**

Частота, кГц	Относительная влажность воздуха, %				
	10	20	40	60	80
1	0,13	0,06	0,03	0,03	0,03
2	0,47	0,23	0,10	0,09	0,08
4	1,27	0,82	0,38	0,24	0,20
6	1,87	1,61	0,84	0,54	0,39
10	2,53	3,28	2,20	1,47	1,08

Таблица 12. **Свойства Земли на разных глубинах и скорость сейсмических волн**

H, км	ρ, 10^3 кг/м^3	v_1, км/с	v_2, км/с	p, ГПа	g, м/с^2
33	3,32	8,18	4,63	0,9	9,85
100	3,38	8.18	4,63	3,1	9,89
200	3,47	8,29	4,63	6,5	9,92
500	3,89	9,65	5,31	17,4	9,99
1000	4,68	11,42	6,36	39,2	9,95
2000	5,24	12,79	6,93	88	9,86
4000	10,8	9,51	—	240	8,00
5000	11,5	10,44	--	318	6,13

Примечание. Механические волны, распространяющиеся в толще земной коры, называют *сейсмическими*. Сейсмические волны могут быть как продольными v_1 (волны сжатия), так и поперечными v_2 (волны сдвига); указаны плотность ρ, давление p, ускорение g, глубина H.

Таблица 13. **Скорость звука в газах при нормальном давлении**

Газ	t, С	v, м/с	α, м/(с·К)	Газ	t, С	v, м/с	α, м/(с·К)
Азот	0	334	0,6	Гелий	0	965	0,8
Аммиак	0	415	—	Кислород	0	316	0,56
Водород	0	1284	2,2	Углекислый газ	0	259	0,4
Водяной пар	134	494	—				
Воздух	0	331	0,59	Неон	0	435	0,8

Примечание. Скорость звука в газах при постоянном давлении увеличивается с повышением температуры. Для расчета скорости при других температурах приведен температурный коэффициент скорости α.

Таблица 14. **Скорость звука в твердых изотропных материалах при 20 °С**

Материал	v_0, м/с	v_1, м/с	v_2, м/с	Материал	v_0, м/с	v_1, м/с	v_2, м/с
Алюминий	5080	6260	3080	Полистирол	—	2350	
Гипс	—	4970	2370	Пробка	500	—	—
Железо	5170	5850	3230	Резина	46	1040	27
Каучук	—	1479	—	Свинец	2640	3600	1590
Латунь	3490	4430	2123	Сталь угле-			
Лед	3280	3980	1990	родистая	5050	6100	3300
Медь	3710	4700	2260	Стекло			
Мрамор	—	6150	3260	кварцевое	5370	5570	3515
Никель	4785	5630	3969	Стекло	3490—	3760—	2220—
Олово	2730	3320	1670		5300	5660	3420
Песча-	—	3700—	—	Фарфор	4884	5340	3120
ник		4900		Эбонит	1570	2405	—
Плексиглас	—	2670					

Примечание. v_0 — скорость звука в стержнях, v_1 — скорость продольных волн, v_2 — скорость поперечных волн.

Таблица 15. **Удельные теплоемкости c_p, теплоты плавления λ, теплоты парообразования r, температуры плавления $t_{пл}$ и кипения $t_{кп}$**

Вещество	c_p, кДж/(кг · К)	$t_{пл}$, °С	λ, кДж/кг	$t_{пл}$, $t_{кп}$, °С	r, кДж/кг
Алюминий	0,88	658,3	322—394	2300	9220
Ацетон	2,18	−94,3	96	56,2	524
Бензол	1,705	5,5	127	80,2	396
Висмут	0,13	271	50	1560	855
Глицерин	2,4	—	176	290	825
Германий	0,31	958	478	2700	—
Железо	0,45	1530	293	3050	6300
Золото	0,13	1064,4	66,6	2800	1575
Калий	0,763	64	60,8	760	2080
Латунь	0,38	900	—	—	—
Лед (вода)	4,19	0	334	100	2260
Литий	4,40	186	628	1317	20500
Магний	1,3	651	373	1103	5450
Медь	0,39	1083	214	2360	5410
Натрий	1,3	9,8	113	883	4220
Нафталин	1,3	80,3	151	218	316
Никель	0,46	1452	243—306	3000	7210

Продолжение

Вещество	c_p, кДж/(кг · К)	$t_{пл}$, °С	λ, кДж/кг	$t_{пл}$, $t_{кп}$, °С	r, кДж/кг
Олово	0,23	231,9	59	2270	3020
Ртуть	0,138	−38,9	11,73	356,7	285
Свинец	0,13	327,3	22,5	1750	880
Серебро	0,235	961,9	88	2184	2350
Спирт этиловый	2,43	−114	105	78,3	846
Сплав Вуда	0,17	65,5	35	—	—
Сталь	0,46	1300—1400	205	—	—
Толуол	1,73	−95,1	72,1	110,7	365
Чугун	0,50	1100—1200	96—138	—	—

Таблица 16. **Температурный коэффициент длины α твердых изотропных тел при температуре около 20 °С**

Вещество	α, 10^{-4} $К^{-1}$	Вещество	α, 10^{-4} $К^{-1}$
Алмаз	0,91	Лед (от −10° до 0° С)	50,7
Алюминий	22,9	Магний	25,1
Бронза	17,5	Медь	16,7
Винипласт	70	Нейзильбер	18,4
Висмут	13,4	Никель	13,4
Вольфрам	4,3	Олово	21,4
Гранит	8,3	Платина	8,9
Дерево (вдоль волокон)	2—6	Платино-иридиевый	8,7
Дерево (поперек волокон)	50—60	Свинец	28,3
Дюралюминий	22,6	Сталь нержавеющая	9,6—16,0
Железо кованое	11,9	Сталь углеродистая	11,1—12,6
» литое	10,2	Стекло обычное	8,5
Золото	14,5	—»— пирекс	3,0
Инвар (36,1% никеля)	0,9	Углерод (графит)	7,9
Иридий	6,5	Фарфор	3,0
Кварц (плавленый)	0,5	Цинк	30,0
Кирпичная кладка	5,5	Цемент и бетон	12,0
Константан	17,0	Чугун	10—12
Латунь	18,9	Эбонит	70

Таблица 17. **Относительное изменение объема при плавлении**

Вещество	$\Delta V/V$, %	Вещество	$\Delta V/V$, %
Алюминий	6,6	Медные сплавы	3,0 — 4,5
Алюминиевые сплавы	4,5 — 5,9	Натрий	2,5
Висмут	−3,32	Олово	2,6
Галлий	−3	Ртуть	3,6
Золото	5,19	Свинец	3,6
Индий	2,5	Серебро	4,99
Кадмий	4.74	Сталь углеродистая	4,5 — 6,0
Калий	2,41	Сурьма	−0,94
Лед (вода)	−8,3	Цезий	2,6
Литий	1.5	Цинк	6,9
Магний	4,2	Чугун серый	2,4 — 3,6

Таблица 18. **Удельная теплоемкость газов при нормальном давлении c_p, кДж/(кг·К), $\gamma = c_p/c_V$**

Температура, С	Кислород		Воздух	
	c_p	γ	c_p	γ
0	0,9149	1,397	1,006	1,400
100	0,934	1,385	1,010	1,397
200	0.964	1,37	1,027	1,390
300	0,9948	1,353	1,048	1,378
600	1,069	1,321	1,115	1,345

Температура, С	Углекислый газ		Водяной пар		Этиловый спирт	
	c_p	γ	c_p	γ	c_p	γ
0	0,8148	1,301	—	—	1,341	1,16
100	0,9136	1,260	1,103	1,28	1,689	1,12
200	0,9926	1,235	1,978	1,30	2,011	1,10
300	1,057	1,217	2,015	1,29	2,321	1,08
600	1,192	1,188	2,208	1,26	3,168	1,06

Таблица 19. **Температурный коэффициент объема β жидкостей. Температура 18°С**

Вещество	β, 10^{-4} К$^{-1}$	Вещество	β, 10^{-4} К$^{-1}$
Аналин	8,5	Вода при 5 — 10°	0,53
Ацетон	14,3	» 10 — 20°	1,50
Бензол	10,6	» 20 — 40°	3,02

Продолжение

Вещество	β, 10^{-4} К$^{-1}$	Вещество	β, 10^{-4} К$^{-1}$
Вода при 40—60°	4,58	Скипидар	9,4
» 60—80°	5,87	Спирт метиловый	11,9
Глицерин	5,0	» пропиловый	9,8
Керосин	10,0	» этиловый	11,0
Кислота азотная	12,4	Толуол	10,8
Нефть	9,2	Хлороформ	12,8
Ртуть	1,8	Эфир этиловый	16,3
Сероуглерод	11,9		

Таблица 20. **Критические параметры**

Вещество	$t_к$, С	$p_к$, МПа	$\rho_к$, 10^3·кг/м^3
Азот	−146,1	3,39	0,311
Ацетон	235	4,76	0,268
Бензол	288,6	4,83	0,304
Вода	374,15	22,11	0,315
Водород	−239,9	1,3	0,031
Гелий	−267,9	0,2	0,069
Кислород	−118,8	5,03	0,430
Кислота уксусная	321,6	5,79	0,351
Метан	−82,5	4,64	0,162
Нафталин	468,2	3,97	—
Спирт метиловый	240	7,97	0,272
Спирт пропиловый	263,7	5,07	0,273
Спирт этиловый	243,1	6,38	0,276
Толуол	320,6	4,21	0,292
Углекислый газ	31,1	7,39	0,460

Таблица 21. **Теплопроводность газов при нормальном давлении**

Вещество	Температура, С	λ, 10^{-4} Вт/(м·К)	Вещество	Температура, С	λ, 10^{-4} Вт/(м·К)
Азот	15	251	Гелий	43	1558
Аргон	41	187	Кислород	20	262
Водород	15	1754	Метан	0	307
Воздух	20	257	Углекислый газ	20	162

Таблица 22. **Температурные коэффициенты давления газов**

Газ	Азот	Аммиак	Водород	Воздух	Гелий	Кислород	Углекислый газ
$\beta, 10^{-3}\,K^{-1}$	3,674	3,802	3,662	3,674	3,660	3,674	3,726

Таблица 23. **Коэффициенты диффузии газов в воздухе при 0 °С и нормальном давлении**

Газ	D, 10^{-4} м²/с	Газ	D, 10^{-4} м²/с
Аммиак	0,2	Метан	0,2
Ацетилен	0,19	Метиловый спирт	0,13
Бензин авиационный	0,079	Сероуглерод	0,09
Водород	0,64	Углекислый газ	0,14
Водяной пар	0,21	Этиловый спирт	0,10

Таблица 24. **Газокинетические диаметры молекул**

Вещество	Диаметр, нм	Вещество	Диаметр, нм
Азот	0,37	Метан	0,444
Аргон	0,36	Неон	0,354
Водород	0,27	Окись углерода	0,370
Гелий	0,215	Ртуть	0,30
Кислород	0,356	Углекислый газ	0,454
Криптон	0,314	Хлор	0,544
Ксенон	0,40		

Таблица 25. **Постоянные Ван-дер-Ваальса**

Вещество	a, $\frac{Дж \cdot м^3}{моль}$	b, $10^{-6}\,\frac{м^3}{моль}$	Вещество	a, $\frac{Дж \cdot м^3}{моль}$	b, $10^{-6}\,\frac{м^3}{моль}$
Азот	0,141	39,2	Ксенон	0,415	51
Аммиак	0,422	37,2	Метан	0,228	27,1
Аргон	0,136	32,3	Неон	0,21	17,1
Ацетон	1,58	98,5	Пропан	0,92	84,5
Бензол	1,85	115	Ртуть	0,82	16,7
Вода	0,555	30,5	Спирт метиловый	0,95	67
Водород	0,0245	26,6	» пропиловый	1,5	101
Гелий	0,0035	23,8	» этиловый	1,22	84
Кислород	0,138	31,8	Эфир этиловый	1,75	134
Криптон	0,234	39,9			

Таблица 26. **Вязкость газов при 0 °С**

Вещество	η, 10^{-5} Па·с	Вещество	η, 10^{-5} Па·с
Азот	1,67	Кислород	1,92
Аммиак	0,93	Метан	1,04
Водород	0,84	Окись азота	1,72
Воздух	1,72	Окись углерода	1,67
Гелий	1,89	Углекислый газ	1,40
Закись азота	1,38	Хлор	1,29

Таблица 27. **Вязкость газов при различных давлениях η, мкПа·с**

Газ	Температура, t, °С	Давление, МПа			
		5,07	10,1	30,4	81,0
Азот	25	18,1	19,9	26,8	45,8
	75	20,5	21,5	26,6	41,6
Воздух	0	18,2	19,7	28,6	
	25	19,2	20,6	28,0	—
	100	22,4	23,4	28,1	—
Углекислый газ	40	18,1	48,8	—	—

Таблица 28. **Вязкость воды при различных температурах**

t, °С	0	5	10	15	20	25	30
η, мкПа·с	1797	1518	1307	1140	1004	895	803
t, °С	40	50	60	70	80	90	100
η, мкПа·с	655	551	470	407	357	317	284
t, °С	110	120	130	140	150	160	
η, мкПа·с	256	232	212	196	184	174	

Таблица 29. **Вязкость жидкостей при 18 °С**

Вещество	η, 10^{-2} Па·с	Вещество	η, 10^{-2} Па·с
Анилин	0,46	Касторовое масло	120,0
Ацетон	0,0337	Масло машинное	
Бензол	0,0673	легкое	11,3
Вода	0,105	Масло машинное	
Глицерин	139,3	тяжелое	66,0

Продолжение

Вещество	η, 10^{-2} Па·с	Вещество	η, 10^{-2} Па·с
Масло цилиндровое очищенное (40 °С)	0,109	Ртуть	0,159
		Сероуглерод	0,0382
Масло цилиндровое темное	24,0	Спирт этиловый	0,122
		Толуол	0,0613
Пентан	0,0244		

Таблица 30. **Поверхностное натяжение жидкостей при 20 °С**

Вещество	α, мН/м	Вещество	α, мН/м
Азотная кислота	59,4	Нефть	26
Анилин	42,9	Нитробензол	43,9
Ацетон	23,7	Серная кислота	57,4
Вода	73,0		

Таблица 31. **Удельная теплота сгорания топлива**

Топливо	$W_в$	$W_н$
Твердое		
Антрацит (марки «А»)	32—34	19—27
Бурые угли	25,0—29,0	10,0—17,0
Горючие сланцы	27,0—33,0	6,3—8,4
Древесный уголь (сухой)	30,0	—
Дрова	19,0	10,0
Каменные угли длиннопламенные	31,0—32,0	21,0—24,0
Торф	22,0—25,0	8,4—11,0
Жидкое (20 °С, 101325 Па)		
Бензин высшего качества	—	44,1
Дизельное топливо	—	42,7
Керосин	—	43,0
Мазут	—	39,0—41,0
Этиловый спирт	—	27,2
Газообразное (0 °С, 1013 гПа)		
Ацетилен	50,0 (58,2)	48,2 (56,0)
Бутан	49,6 (132,0)	46,1 (123,0)
Водород	142,0 (12,8)	120,0 (10,8)
Коксовый газ (очищенный)	—	34,8 (16,4)

Продолжение

Топливо	$W_в$	$W_н$
Природный газ	—	42,0—47 (33—36)
Пропан	50,4 (101)	46,6 (94)

Примечание. Теплота сгорания, определяемая без учета потерь на испарение воды, содержащейся в топливе, называется высшей теплотой $W_в$, с учетом их — низшей теплотой $W_н$ (МДж/кг). На практике теплота сгорания газообразного топлива рассчитывается на один кубический метр (при нормальном давлении и температуре 0 °С); значения в МДж/м^3 указаны в скобках.

Таблица 32. **Электроизолирующие материалы**

ε — диэлектрическая проницаемость, E — пробивная напряженность, ρ' — плотность, ρ — удельное сопротивление

Материал	ε	E, МВ/м	ρ', 10^3 кг/м^3	ρ, Ом·м
Асбест	—	2	2,3—2,6	$2 \cdot 10^3$
Бакелит	4—4,6	10—40	1,2	—
Битум	2,6—3,3	6—15	1,2	—
Гетинакс	5—6,5	10—30	1,3	—
Канифоль	3,5	—	1,1	$5 \cdot 10^{14}$
Мрамор	8—10	6—10	2,7	$1 \cdot 10^8$
Парафин	2,2—2,3	20—30	0,4—0,9	$3 \cdot 10^{11}$
Плексиглас	3,0—3,6	18,5	1,2	—
Полистирол	2,2—2,8	25—50	1,05—1,65	$5 \cdot 10^{13}$—$5 \cdot 10^{15}$
Полихлорвинил	3,1—3,5	50	1,38	—
Радиофарфор	6,0	15—20	2,5—2,6	—
Резина мягкая	2,6—3	15—25	1,7—2,0	$4 \cdot 10^{11}$
Слюда	4,5—8	50—200	2,8—3,2	10^{11}—10^{15}
Стекло	4—10	20—30	2,2—4,0	10^9—10^{12}
Текстолит	7	2—8	1,3—1,4	—
Фарфор электротехнический	6,5	20	2,4	$3 \cdot 10^{12}$
Шифер	6—7	5—14	2,6—2,9	10^6
Эбонит	4—4,5	25	1,3	10^{16}
Янтарь	2,7—2,9	20—30	1,06—1,11	10^{11}

Таблица 33. **Диэлектрическая проницаемость жидкостей**

Вещество	Температура, °С						
	0	10	20	25	30	40	50
Ацетон	23,3	22,5	21,4	20,9	20,5	19,5	18,7
Бензол	—	2,30	2,29	2,27	2,26	2,25	2,22
Глицерин	—	—	56,2	—	—	—	—
Керосин	—	—	2,0	—	—	—	—
Четыреххлористый углерод	—	–	2,24	2,23	—	2,20	2,18
Этиловый спирт	27,88	26,41	25,00	24,25	23,52	22,16	20,87
Этиловый эфир	4,80	4,58	4,38	4,27	4,15	—	—

Примечание. Примеси в небольших количествах мало влияют на значение диэлектрической проницаемости.

Таблица 34. **Диэлектрическая проницаемость газов при 18 °С и нормальном давлении**

Вещество	$(\varepsilon-1),\ 10^{-5}$	Вещество	$(\varepsilon-1),\ 10^{-5}$
Азот	61	Кислород	55
Водород	26	Пары воды	180
Воздух	59	Углекислый газ	97
Гелий	7		

Примечание. Диэлектрическая проницаемость газов уменьшается с повышением температуры и возрастает с увеличением давления.

Таблица 35. **Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления металлов при 20 °С**

Металл	$\rho,\ 10^{-8}$ Ом·м	$\varkappa,\ 10^{-3}\ K^{-1}$	Металл	$\rho,\ 10^{-8}$ Ом·м	$\varkappa,\ 10^{-3}\ K^{-1}$
Алюминий	2,8	4,9	Никель	10,0	5,0
Бронза фосфористая	8,0	4,0	Олово	11,5	4,2
			Свинец	22,1	4,1
Вольфрам	5,5	4,5	Ртуть	95,8	0,9
Железо	9,8	6,2	Серебро	1,6	3,6
Латунь	2,5—6,0	2—7	Тантал	15,5	3,1
Медь	1,75	3,9	Хром	2,7	—
Молибден	5,7	3,3	Цинк	5,9	3,5

Примечание. Указанные в таблице значения являются средними; их величина для различных образцов зависит от степени чистоты, термообработки и т. д.

Таблица 36. **Сплавы с высоким активным сопротивлением при 20 °С**

Сплав (состав в %)	ρ, 10^{-6} Ом·м	$\varkappa$, 10^{-3} K^{-1}	t, °С
Константан (58,8 Cu, 40 Ni, 1,2 Mn)	0,44—0,52	0,01	500
Манганин (85 Cu, 12 Mn, 3 Ni)	0,42—0,48	0,03	100
Нейзильбер (65 Cu, 20 Zn, 15 Ni)	0,28—0,35	0,04	150
Никелин (54 Cu, 20 Zn, 26 Ni)	0,39—0,45	0,02	1000
Нихром (67,5 Ni, 15 Cr, 16 Fe, 1,5 Mn)	1,0—1,1	0,2	1000
Реотан (84 Cu, 12 Mn, 4 Zn)	0,45—0,52	0,4	150
Фехраль (80 Fe, 14 Cr, 6 Al)	1,1—1,3	0,1	900

Таблица 37. **Удельное сопротивление электролитов различных концентраций при 18 °С**

Растворенное вещество	С, %	ρ′, 10^3 кг/м^3	ρ, 10^{-2} Ом·м	$\varkappa$, K^{-1}
Азотная кислота	10	1,05	2,1	0,0145
	20	1,12	1,5	0,0137
	30	1,18	1,3	0,0139
	40	1,25	1,4	0,0150
Едкий натр	5	1,05	5,1	0,0201
	10	1,11	3,2	0,0217
	20	1,22	3,0	0,0299
	40	1,43	8,3	0,0648
Медный купорос	5	1,062	52,9	0,0216
	10	1,107	31,5	0,0218
	17,5	1,206	23,8	0,0236
Нашатырь	5	1,011	10,9	0,0198
	10	1,029	5,6	0,0186
	20	1,057	3,8	0,0161
Поваренная соль	5	1,034	14,9	0,0217
	10	1,071	8,3	0,0214
	20	1,148	5,1	0,0716
Серная кислота	5	1,032	4,8	0,0121
	20	1,14	1,5	0,0145
	30	1,22	1,4	0,0162
	40	1,30	1,5	0,0178
Соляная кислота	5	1,023	2,5	0,0158
	20	1,1	1,3	0,0154
	40	1,2	1,9	—

Таблица 38. **Свойства полупроводников**

$t_{пл}$ — температура плавления, E_0 — ширина запрещенной зоны, u_n, u_p — подвижности электронов и дырок

Вещество	$t_{пл}$, С	E_0, эВ	u_n, 10^{-4} м^2/(В·с)	u_p, 10^{-4} м^2/(В·с)
Бор (B)	2030	1,16	1	50
Алмаз (C)	4030	5.4	1800	1400
Фосфор (черный) (P)	44	0.33	220	350
Мышьяк (серый) (As)	817	1,2	65	65
Олово (α=Sn)	232	0,08	2500	2400
Сурьма (Sb)	630	0,13	—	—
Селен (серый) (Se)	217	2,8	—	20
Теллур (Te)	450	0,32	1700	1200
Иод (I)	114	1,3	25	—
Кремний (Si)	1414	1,15	1900	500
Германий (Ge)	958	0,75	3900	1900
Селенид свинца (PbSe)	1065	0,5	1400	1400
Сульфид свинца (PbS)	1114	1,2	650	800
Бромистое серебро (ArBr)	430	2,0	240	10^5 (1,7 К)
Сульфид кадмия (CdS)	1750	2,5	350	15—50
Закись меди (Cu_2O)	1232	1,5—2,2	—	100
Рубин (α-Al_2O_3)	2050	2,5	—	—
Окись цинка (цинкит)	1975	3,4	200	—

Примечание. Подвижности указаны для комнатной температуры при напряженностях, меньших критического поля. Вследствие зависимости подвижности от напряжения электрического поля в полупроводниках могут наблюдаться отступления от закона Ома. Наименьшая напряженность поля, начиная с которой наблюдаются отступления от закона Ома, называется *критическим полем*.

Таблица 39. **Гальванические элементы и аккумуляторы**

Источник тока (шифр электрохимической системы)	Электрохимическая система	ЭДС, В (рабочее напряжение)	Примеры
Гальванические элементы			
Элементы Лекланше (МЦ)	Цинк (с диоксидом марганца); водный раствор хлорида аммония и хлорида цинка	1,5 (1,2)	Элементы: «Уран-М» (736), «Юпитер-М» (343), «Орион-М» (373); Батареи: «Планета» (3336), «Крона»

Продолжение

Источник тока (шифр электрохимической системы)	Электрохимическая система	ЭДС, В (рабочее напряжение)	Примеры
Угольно-цинковые элементы (МЦ)	Цинк, графит (с диоксидом марганца); водный раствор хлорида цинка	1,5 (1,2)	—
Алкалические элементы (А)	Цинк — уголь (с диоксидом марганца); водный раствор гидроокиси калия	1,5 (1,25)	Батареи: «Корунд», «Рубин». Элементы: «Сапфир»-316 ВЦ, А332
Элементы с воздушной деполяризацией (ВД)	Цинк — политетрафторэтилен с активированным углем, гидрат окиси калия, воздух	1,4 (1,2)	Батареи: «Крона ВЦ», «Сапфир ВЦ», «Люкс»
Ртутно-цинковые элементы (РЦ)	Цинк — оксид ртути — гидрат оксида натрия	1,35 (1,25)	Элементы РЦ-53, РЦ-55 и др. Батареи 3 РЦ-53 и др.
Серебряно-цинковые элементы (СЦ)	Цинк — одновалентное серебро — гидрат оксида калия или натрия	1,6 (1,5)	Элементы СЦ-21, СЦ-30 и др.
Литиевые элементы с органическим электролитом (Л)	Литий — хромат серебра; или литий — диоксид марганца.	3,1 (3)	Элемент CR1/3N
	Литий — окись меди; или литий — соединения свинца с висмутом	1,6 (1,5)	Батареи: PX20L, V28PXL
	Аккумуляторы		
кислотно-свинцовые	Губчатый свинец — диоксид свинца PbO_2 — 27—28%-процентный водный раствор H_2SO_4.	2,0— 1,9	6 СТ-68, 3 МТМ-14
щелочные серебряно-цинковые	Окись цинка — серебро — раствор КОН	1,5	СЦС-25, СЦС-100 и др.
щелочные железо-никелевые (или кадмиево-никелевые)	Порошкообразное железо — гидроксид никеля — 20%-ный раствор КОН	1,4 —1,1	4НКН-45, 4ЖН-45 и др.

Таблица 40. **Магнитные свойства магнитно-мягких материалов**

Марка материала, состав % (по массе)	B_s, 10^{-2} Тл	θ, °С	ρ, 10^{-6} Ом·м	$\mu_н$, 10^3	H_c, А/м
80 НМ — супермаллой (80Ni, 5Mo, 15Fe)	8	400	0,55	100 (1000)	0,4
79 НМ — молибденовый пермаллой (79Ni, 4Mo, 17Fe)	8	450	0,5	40(200)	1,6
50 Н (50Ni, 50Fe)	15	500	0,45	5(100)	8,0
40 НКМП — перминвар (40Ni, 25Co, 4Mo, 31Fe)	14	600	0,63	2(~2)	—
49 КФ-ВИ — пермендюр (49Co, 2V, 49Fe)	23,5	980	0,4	1(50)	40
10 СЮ — альсифер (5,4Al; 9,6Si; 0,005—0,08Ge; ~85Fe)	—	500	0,7	15—20 (50—70)	0,4—3,2
Железо армко (100Fe)	21,5	768	0,12	0,5(10)	63,7
Железо карбонильное (96,8Fe; 1,2O_2)	0,8—1,1	768	—	10—20	8—40
Ni—Zn феррит, (Ni, Zn) $0 \cdot Fe_2O_3$	2—3	150—500	10^9	50—500	39,8—119,4
Mn—Zn феррит, (Mn, Zn) $O \times \times Fe_2O_3$	3,5—4	170	10^5	1000 (2500)	47,8

Примечание. B_s — индукция насыщения, θ — температура Кюри, ρ — удельное сопротивление, $\mu_н$ — начальная магнитная проницаемость (в скобках указаны максимальные значения), H_c — коэрцитивная сила.

Таблица 41. **Основные свойства магнитно-твердых материалов**

Эти материалы имеют высокую коэрцитивную силу; они применяются для изготовления постоянных магнитов. Важной характеристикой их является наибольшее значение величины BH, которая пропорциональна максимальной энергии магнитного поля, окружающего ферромагнетик

Марка материала, состав в % (по массе)	B_s, Тл	H_c, кА/м	BH, кДж/м^3
У — 13 (1,3C; 98,7Fe)	0,8	4,8	1,8
Е — 7 В6 (0,7C; 0,4Cr; 5,7W; 0,4Si; 92,8Fe)	1,04	5,4	2,9
Е Х 9 К15М (1C; 9Cr; 1,5Mo; 88,5Fe)	0,82	12,7	4,4
12 КМВ — комол (12Co; 6Mo; 12W; 70Fe)	1,05	19,9	8,8
ЮНД4 — ални (25Ni; 12Al; 4Cu; 59Fe)	0,61	39,8	7,2
ЮНДК — 24 — магнико (14Ni; 8Al; 24Co; 3Cu; 51Fe)	1,23	47,8	31,8
ЮНДК 35 Т5ВА — тиконал (14Ni; 8Al; 35Co; 3Cu; 5Ti; Nb < 1)	1,0	119,4	79,6
ПлК76 — платинакс (76Pt; 24Co)	0,79	318,4	95,5
52КФ13 — викаллой (52Co; 13V; 35Fe)	0,6	39,8	—

Продолжение

Марка материала, состав в % (по массе)	B_s, Тл	H_c, кА/м	BH, кДж/м^3
2 ФК — кобальт-феррит ($CoO \cdot Fe_2O_3$)	0,3	143,3	15.9
1 БИ — барий-феррит ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$), изотропный	0,2	135,3	8,0
3 Ба — барий-феррит ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$) анизотропный	0,37	159,2	23.8
Co_3Sm, анизотропный	0,94	270,6	191,0

Примечание. B_s — остаточная индукция, H_c — коэрцитивная сила.

Таблица 42. **Индукция и потери на гистерезис в ферромагнетиках и ферритах**

Материалы	H, А/м						Потери, Дж/м^3
	8	40	160	800	4000	40 000	
Железо электролитическое	0,004	0,05	1,1	1,5	1,7	2,1	250
Железо отожженное	0,01	0,075	1,4	1,6	1,72	2,1	60
Железо кремнистое листовое (4,3%)	0,02	0,45	1,0	1,35	1,53	1.95	69
Железо кобальтовое (35% Co)	—	—	0,4	1,5	2,1	2,4	350
Чугун отожженный	—	—	0,06	0,5	0,85	1,4	1000
Сталь мягкая (0,1% C)	0,003	0,03	0,6	1,4	1,7	2,1	500
» листовая	0,004	0,04	0,9	1,45	1,65	2,1	250
Феррит Mn—Zn	0,008	0,05	0,23	0,36	—	—	—
» Ni—Zn	0,0005	0,008	0,01	0,15	0,24	—	—
» Mg—Mn	—	0,01	0,2	0,23	—	—	—
» 30% Ni—Fe	—	—	—	0,25	0,31	—	—
» 70% Ni—Cu	—	—	—	0,05	0,1	—	—

Примечания. 1. Значения B (Тл) следует рассматривать как ориентировочные. 2. В последней графе указаны потери за один цикл перемагничивания в объеме вещества 1 м^3 для петли гистерезиса с максимальным значением индукции 0,1 Тл.

Таблица 43. **Шкала электромагнитных излучений**

Частота, Гц	Длина волны, м	Название диапазона	Основные источники возбуждения
10^{-3} 10^3	$3 \cdot 10^{11}$ $3 \cdot 10^5$	Низкочастотные (сверхдлинные) волны	Генераторы специальных конструкций; промышленные частоты 50—60 Гц; ге-

Продолжение

Частота, Гц	Длина волны, м	Название диапазона	Основные источники возбуждения
			нераторы звуковых частот до 20 кГц
10^3 10^{12}	$3 \cdot 10^5$ $3 \cdot 10^{-4}$	Радиоволны	Генераторы радиочастот до 300 МГц; генераторы сверхвысоких частот (СВЧ)
10^{12} $4 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{-4}$ $8 \cdot 10^{-7}$	Инфракрасное излучение	
$4 \cdot 10^{14}$ $8 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{-7}$ $4 \cdot 10^{-7}$	Видимое излучение (с длинами волн от 800 до 400 нм)	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических воздействиях
$8 \cdot 10^{14}$ $3 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{-7}$ 10^{-9}	Ультрафиолетовое излучение; мягкое рентгеновское излучение	Излучение атомов при облучении вещества электронами с энергиями до 15 кэВ
$3 \cdot 10^{17}$ $3 \cdot 10^{20}$	10^{-9} 10^{-12}	Рентгеновское излучение, гамма-излучение	Атомные процессы, которые возбуждаются электронами с энергиями от 20 кэВ до нескольких сотен МэВ
$3 \cdot 10^{20}$ 10^{23}	10^{-12} $3 \cdot 10^{-15}$	Гамма-излучение	Ядерные процессы, радиоактивные распады

Примечание. Между соседними диапазонами нет четкой границы раздела.

Таблица 44. **Световая отдача, КПД, яркость источников света**

Источник света	Φ/P, лм/Вт	КПД, %	T, К	Яркость, кд/м^2
Лампа: 50 Вт (пустотная)	10	1,6	2460	$1{,}5—2{,}0 \cdot 10^7$
50 Вт (газонаполн.)	10	1,6	2685	$5 \cdot 10^6$
500 Вт (газонаполн.)	17,5	2,8	2900	10^7
2000 Вт (газонаполн.)	21	3,5	3020	$1{,}5 \cdot 10^7$
люминесцентная	40—60	6,4	—	$5—7\ 10^3$
Поверхность Солнца	—	—	6000	10^9
Вольтова дуга (в кратере)	25	4	4000	$1{,}5 \cdot 10^8$
Искра при разряде в газе	—	—	—	$10^{11}—10^{12}$
Экраны телевизионных кинескопов	—	—	—	100—200
Ночное безлунное небо	—	—	—	10

Примечание. Световая отдача — отношение светового потока Φ к мощности тока P, потребляемой источником света; КПД $= \Phi/(683P)$.

Таблица 45. **Освещенность**

Освещение	Освещенность, лк
Солнечными лучами в полдень (средние широты)	100 000
При киносъемке в студии	10 000
На открытом месте в пасмурный день	1000
В светлой комнате (вблизи окна)	100
На рабочем столе для тонких работ	100—200
Необходимое для чтения	30—50
На экране кинотеатра	85—120
От полной Луны	0,2
От ночного неба в безлунную ночь	0,0003

Таблица 46. **Поглощение солнечной радиации поверхностью Земли**

Поверхность	Альбедо
Водная поверхность	0,03—0,04
Влажные свежевспаханные черноземы	0,05
Поверхность с растительным покровом	0,13—0,25
Бесснежная подстилающая поверхность суши	0,15—0,17
Поверхность пустыни	0,25—0,30
Поверхность ледников	0,5
Снежный покров	0,5—0,6
Наземные и плавучие морские и озерные льды	0,5—0.6
Сплошной паковый лед со снегом	0,8
Земля как планета (среднее значение)	0,34
Безоблачные участки атмосферы Земли (среднее значение)	0,09
Облака	0,01—0,8

Примечания. 1) *Альбедо* - отношение потока энергии отраженной радиации к потоку излучения, падающего на данную поверхность. Указанные в таблице значения альбедо соответствуют нормальному падению солнечной радиации на облучаемую поверхность.
2) Среднее альбедо по северному полушарию 0,08 0,14, по южному 0,06- 0,08.

Таблица 47. **Отражение света металлами**

Название группы волн	Длина волны, нм	Алюминий	Медь	Сталь	Серебро	Никель	Хром	Цинк	Кремний
Ультрафиолетовые	188	—	—	22	22	—	33	17	64
	200	—	—	27	25	—	36	22	73
	251	80	25	38	34	38	—	39	75
	305	—	25	44	9	44	37	48	73
	357	84	27	50	75	49	41	51	60
Световые	500	88	44	56	91	61	55	55	34
	600	89	72	57	93	65	—	58	32
	700	87	83	58	95	69	56	61	
Инфракрасные	900	85	89	61	97	70	—	62	—
	1000	93	90	63	97	72	57	69	—
	5000	94	98	90	99	94	81	97	—
	10000	97	98	94	99	—	93	—	—

Примечание. Значения коэффициентов отражения при нормальном падении света даны в процентах; отражающие поверхности металлов полированы.

Таблица 48. **Дисперсия показателя преломления**

Излучение	Длина волны, нм	Стекло		Кварц		Плавленый кварц	Вода при 20 °С	Сильвин при 18 °С
		легкий крон	тяжелый крон	Обыкновенная волна	Необыкновенная волна			
Инфракрасное	22300	—	—	—	—	—	—	1,3712
	9429	—	—	—	—	—	—	1,4587
	4200	—	—	1,4569	—	—	—	1,4720
	2172	1,4946	1,6153	1,5180	1,5261	—	—	1,4750
	1256	1,5042	1,6268	1,5316	1,5402	—	1,3210	1,477
Видимое	670,8	1,5140	1,6434	1,5415	1,5505	1,4561	1,3308	1,4866
	643,8	1,5149	1,6453	1,5423	1,5514	1,4568	1,3314	1,4877
	589,3	1,5170	1,6499	1,5443	1,5534	1,4585	1,3330	1,4904
	486,4	1,5230	1,6637	1,5497	1,5590	1,4632	1,3371	1,4983
	404,7	1,5318	1,6852	1,5572	1,5567	1,4697	1,3428	1,5097
Ультрафиолетовое	303,4	1,5552	—	1,5770	1,5872	1,4869	1,3581	1,5440
	214,4	—	—	1,6305	1,6428	1,5339	1,4032	1,5518
	185,2	—	—	1,6759	1,6901	1,5743	—	1,8270
α, 10^{-6} K^{-1}		−1	3	−5	−6	−3	−80	−40

Примечания 1. Показатели преломления даны относительно воздуха. 2. Температурный коэффициент α — изменение показателя преломления при повышении температуры на 1 К. Минус указывает, что при увеличении температуры показатель преломления уменьшается.

Таблица 49. **Удельная постоянная вращения (при температуре 20 °С, $\lambda = 589{,}3$ нм)**

Вещество	Растворитель	$[\alpha]$
Сахар: тростниковый	Вода	0.665
виноградный	Вода	0,525
фруктовый	Вода	– 0.919
Глюкоза	Вода	0.525
Виннокаменная кислота	Вода	0,148
Скипидар	Чистый	–0.37
Камфара	Спирт этиловый	0,409
Хинин	Спирт этиловый	–1,69
Никотин	Вода	–0,79

Примечание. Минус указывает на то, что вращение происходит против часовой стрелки, если смотреть на вещество против хода лучей $[\alpha]$ — угловые градусы · м^3/(кг · м). Удельная постоянная вращения зависит от длины волны и температуры.

Таблица 50. **Спектры излучения металлов**

Алюминий (дуга)	Медь (дуга в вакууме)	Ртуть (ртутная лампа)	Натрий (в пламени)	Кадмий (дуга)	Цинк (дуга в вакууме)
308,3	324,8	312,6	588,997	326,1	303.6
309,3	327.4	313,1	589,593	340,4	307,2
394,4	402,3	365,0		346,6	334,5
396,2	406,3	404,68		361.1	468,0
466,3	510,55	435,83		398.2	472,2
505.7	515,33	491,64		441,3	481,1
569.6	521,82	495,97		467,8	491,2
572,3	570,0	546,07		497,99	492.5
	578,21	576,96		508,58	610,3
	578,22	579,07		533.8	536,2
		615,20		537,9	
		623,20		643,85	

Примечание Наиболее яркие линии подчеркнуты.

Таблица 51. **Спектры излучения газов λ, нм**

Азот	Аргон	Водород	Гелий	Кислород
		(в газовом разряде)		
575,4	394,90	410,17	388,86	520,0
580,3	404,44	434,04	402,62	530,0
585,3	415,86	434,05	412,08	(полоса)
590,4	416,42	486,128	501,57	555,0
595,7	418,19	486,136	587,56	564,0
601,2	419,0	656,271	667,81	(полоса)
606,8	419,10	656,285	706,52	
632,1	420,07			
639,3	425,12			
646,7	425,94			
654,3	426,63			
662,2	427,22			
670,3	430,01			
678,7	433,36			
	433,54			

Примечания. 1. Длины волн измерены в воздухе при 15 °С и нормальном давлении (101325 Па).
2. Длины волн наиболее ярких линий подчеркнуты.

Таблица 52. **Распределение электронов во внешних оболочках**

Элемент	Внешние оболочки	Элемент	Внешние оболочки
Водород	$1s^1$	Кальций	$4s^2$
Гелий	$1s^2$	Скандий	$3d^1 4s^2$
Литий	$2s^1$	Титан	$3d^2 4s^2$
Бериллий	$2s^2$	Ванадий	$3d^3 4s^2$
Бор	$2s^2 2p^1$	Хром	$5d^5 4s^1$
Углерод	$2s^2 2p^2$	Марганец	$5d^5 4s^2$
Азот	$2s^2 2p^3$	Железо	$3d^6 4s^2$
Кислород	$2s^2 2p^4$	Кобальт	$3d^7 4s^2$
Фтор	$2s^2 2p^5$	Никель	$3d^8 4s^2$
Неон	$2s^2 2p^6$	Медь	$3d^{10} 4s^1$
Натрий	$3s^1$	Цинк	$3d^{10} 4s^2$
Магний	$3s^2$	Галлий	$4s^2 4p^1$
Алюминий	$3s^2 3p^1$	Германий	$4s^2 4p^2$
Кремний	$3s^2 3p^2$	Мышьяк	$4s^2 4p^3$
Фосфор	$3s^2 3p^3$	Селен	$4s^2 4p^4$
Сера	$3s^2 3p^4$	Бром	$4s^2 4p^5$
Хлор	$3s^2 3p^5$	Криптон	$4s^2 4p^6$
Аргон	$3s^2 3p^6$	Рубидий	$5s^1$
Калий	$4s^1$	Стронций	$5s^2$

Продолжение

Элемент	Внешние оболочки	Элемент	Внешние оболочки
Иттрий	$4d^1 5s^2$	Тантал	$5d^3 6s^2$
Цирконий	$4d^2 5s^2$	Вольфрам	$5d^4 6s^2$
Ниобий	$4d^4 5s^1$	Рений	$5d^6 6s^2$
Молибден	$4d^5 5s^1$	Осмий	$5d^7 6s^2$
Технеций	$4d^5 5s^2$	Иридий	$5d^9 6s^1$
Рутений	$4d^7 5s^1$	Платина	$5d^{10} 6s^1$
Родий	$4d^8 5s^1$	Золото	$5d^{10} 6s^1$
Палладий	$4d^{10} 5s^0$	Ртуть	$5d^{10} 6s^2$
Серебро	$4d^{10} 5s^1$	Таллий	$6s^2 6p^1$
Кадмий	$4d^{10} 5s^2$	Свинец	$6s^2 6p^2$
Индий	$5s^2 5p^1$	Висмут	$6s^2 6p^3$
Олово	$5s^2 5p^2$	Полоний	$6s^2 6p^4$
Сурьма	$5s^2 5p^3$	Астат	$6s^2 6p^5$
Теллур	$5s^2 5p^4$	Радон	$6s^2 6p^6$
Иод	$5s^2 5p^5$	Франций	$7s^1$
Ксенон	$5s^1 5p^6$	Радий	$7s^2$
Цезий	$6s^1$	Актиний	$6d^1 7s^2$
Барий	$6s^2$	Торий	$6d^2 7s^2$
Лантан	$5d^1 6s^2$	Протактиний	$5f^2 6d^1 7s^2$
Церий	$4f^1 5d^1 6s^2$	Уран	$5f^3 6d^1 7s^2$
Празеодим	$4f^3 6s^2$	Нептуний	$5f^4 6d^1 7s^2$
Неодим	$4f^4 6s^2$	Плутоний	$5f^6 7s^2$
Прометий	$4f^5 6s^2$	Америций	$5f^7 7s^2$
Самарий	$4f^6 6s^2$	Кюрий	$5f^7 6d^1 7s^2$
Европий	$4f^7 6s^2$	Берклий	$5f^8 6d^1 7s^2$
Гадолиний	$4f^7 5d^1 6s^2$	Калифорний	$5f^{10} 7s^2$
Тербий	$4f^9 6s^2$	Эйнштейний	$5f^{11} 7s^2$
Диспрозий	$4f^{10} 6s^2$	Фермий	$5f^{12} 7s^2$
Гольмий	$4f^{11} 6s^2$	Менделевий	$5f^{13} 7s^2$
Эрбий	$4f^{12} 6s^2$	Нобелий	$5f^{14} 7s^2$
Тулий	$4f^{13} 6s^2$	Лоуренсий	$5f^{14} 6d^1 7s^2$
Иттербий	$4f^{14} 6s^2$	Курчатовий	$6d^2 7s^2$
Лютеций	$4f^{14} 5d^1 6s^2$	Нильсборий	$6d^3 7s^2$
Гафний	$5d^2 6s^2$		

Таблица 53. **Массовые коэффициенты ослабления электронов в алюминии**

Энергия, эВ	μ/ρ, см^2/г	Энергия, эВ	μ/ρ, см^2/г
$9 \cdot 10^2$	$2{,}5 \cdot 10^6$	$1{,}0 \cdot 10^5$	130
$5{,}8 \cdot 10^3$	$1{,}5 \cdot 10^5$	$2{,}0 \cdot 10^5$	29
$1{,}05 \cdot 10^4$	$3{,}5 \cdot 10^4$	$4{,}6 \cdot 10^5$	9,0
$4{,}66 \cdot 10^4$	740	$6{,}6 \cdot 10^5$	6,0

Таблица 54. **Средний массовый пробег протонов высокой энергии г/см^2**

Энергия, МэВ	Бериллий	Углерод	Воздух	Алюминий	Медь	Свинец
50	2,722	2,488	2,557	2,928	3,599	5,275
75	5,655	5,160	5,293	6,021	7,321	10,52
100	9,481	8,623	8,835	10,01	12,01	17,17
500	144,4	131,3	133,3	148,9	174,9	237,6
1000	404,0	365,3	370,0	412,0	479,4	642,2
5000	2879	2584	2543	2587	3248	4185
10000	5889	5270	5081	5777	6512	8234

Таблица 55. **Относительная масса и активность некоторых изотопов**

Элемент	Число протонов	Число нейтронов	Относительная масса	Содержание %	Род активности	Период полураспада
H	1	0	1,007825	99,99	Стаб.	—
D	1	1	2,014102	0,015	Стаб.	—
T	1	2	3,016049	—	β^-	12,33 г
He	2	1	3,016029	0,00014	Стаб.	—
	2	2	4,002603	~100	Стаб.	—
Li	3	3	6,015123	7,5	Стаб.	—
	3	4	7,016005	92,5	Стаб.	—
Be	4	3	7,016930	—	γ	53,3 сут
	4	9	9,012183	100	Стаб.	—
B	5	5	10,012938	19,8	Стаб.	—
	5	6	11,009305	80,2	Стаб.	—
C	6	5	11,011433	—	β^+	20,4 мин
	6	6	12,000000	98,89	Стаб.	—
	6	7	13,003355	1,11	Стаб.	—
	6	8	14,003242	—	β^-	5730 лет
N	7	6	13,005739	—	β^+	9,96 мин
	7	7	14,003074	99,63	Стаб.	—
	7	8	15,000109	0,37	Стаб.	—
O	8	7	15,003065	—	β^+	122 с
	8	8	15,994915	99,76	Стаб.	—
	8	10	17,999159	0,24	Стаб.	—
F	9	10	18,998403	100	Стаб.	—
Ne	10	10	19,992439	90,51	Стаб.	—
	10	12	21,991384	9,22	Стаб.	—
Na	11	11	21,994435	—	β^+	2602 года
	11	12	22,989770	100	Стаб.	—
	11	13	23,990964	—	β^-, γ	15,0 ч
Mg	12	12	23,985045	78,99	Стаб.	—
	13	14	26,981541	100	Стаб.	—
Si	14	14	27,976928	92,23	Стаб.	—
	14	17	30,975364	—	β^-, γ	2,62 ч
P	15	16	30,973763	100	Стаб.	—
	15	17	31,973908	—	β^-	14,28 сут
S	16	16	31,972072	95,0	Стаб.	—
	16	17	34,969033	—	β^-	87,4 сут
Cl	17	18	34,968853	75,77	Стаб.	—
	17	20	36,965903	24,23	Стаб.	—
Ar	18	22	39,962383	99,60	Стаб.	—
K	19	20	38,963708	93,26	Стаб.	—
	19	21	39,964000	—	β^-	$1{,}28 \cdot 10^9$ лет
Ca	20	20	39,962591	96,94	Стаб.	—

Продолжение

Элемент	Число протонов	Число нейтронов	Относительная масса	Содержание %	Род активности	Период полураспада
Sc	21	24	44,955914	100	Стаб.	—
Ti	22	26	47,947947	73,7	Стаб.	—
V	23	28	50,943963	99,75	Стаб.	—
Cr	24	28	51,940510	83,79	Стаб.	—
Mn	25	30	54,938046	100	Стаб.	—
Fe	26	30	55,934939	91,8	Стаб.	—
Co	27	32	58,933198	100	Стаб.	—
	27	33	59,933820	—	β^-, γ	5,271 года
Ni	28	30	59,930789	26,1	Стаб.	—
Cu	29	34	62,929599	69,2	Стаб.	—
	29	36	64,927792	30,8	Стаб.	—
Zn	30	34	63,929145	48,6	Стаб.	—
	30	36	65,926035	27,9	Стаб.	—
Ga	31	38	68,925581	60,1	Стаб.	
Ge	32	40	71,922080	27,4	Стаб.	—
	32	42	73,921179	36,5	Стаб.	—
As	33	42	74,921576	100	Стаб.	—
Se	34	46	78,916521	49,8	Стаб.	—
Br	35	44	78,918336	50,69	Стаб.	—
Kr	36	48	83,911506	57,0	Стаб.	—
Rb	37	48	84,911800	72,17	Стаб.	—
Sr	38	48	85,909373	9,8	Стаб.	—
	38	50	87,905625	82,6	Стаб.	—
	38	52	89,907746	—	β^-	28,8 года
Y	39	50	88,905856	100	Стаб.	—
Zr	40	50	89,904708	51,5	Стаб.	—
Nb,	41	52	92,906378	100	Стаб.	—
Mo	42	56	97,905405	24,1	Стаб.	—
Tc	43	55	97,907210	—	β^-, γ	$4{,}2 \cdot 10^6$ лет
Ru	44	58	101,904348	36,1	Стаб.	—
Rh	45	58	102,90550	100	Стаб.	—
Pd	46	60	105,690348	27,3	Стаб.	—
Ag	47	60	106,905095	51,83	Стаб.	—
	47	62	108,904754	48,17	Стаб.	—
Cd	48	66	113,903361	28,7	Стаб.	—
In	49	66	114,90388	95,7	β^-	$5{,}1 \cdot 10^{14}$ лет
Sn	50	70	119,902199	32,4	Стаб.	—
Sb	51	70	120,903824	53,7	Стаб.	—
Te	52	78	129,90623	34,5	β^-	$2 \cdot 10^{21}$ лет
I	53	74	126,904477	100	Стаб.	—
	53	78	130,906118	—	β, γ	8,04 сут
Xe	54	78	131,90415	29,6	Стаб.	—
	54	82	135,90722	8,9	Стаб.	—
Cs	55	78	132,90543	100	Стаб.	—
Ba	56	81	136,90582	11,2	Стаб.	—
	56	82	137,90524	71,7	Стаб.	—
La	57	82	138,90636	99,91	Стаб.	—
Ce	58	82	139,90544	—	Стаб.	—
Pr	59	82	140,90766	100	Стаб.	—
Nd	60	82	141,90773	27,2	Стаб.	—
Pm	61	84	144,91275	—	α, γ	17,7 года
Sm	62	90	151,91974	26,6	Стаб.	—
Eu	63	90	152,92124	52,1	Стаб.	—
Gd	64	94	157,92411	24,8	Стаб.	—
Tb	65	94	158,92535	100	Стаб.	—
Dy	66	98	163,92918	28,1	Стаб.	—

Продолжение

Элемент	Число протонов	Число нейтронов	Относительная масса	Содержание %	Род активности	Период полураспада
Ho	67	98	164,93033	100	Стаб.	—
Er	68	98	165,93031	33,4	Стаб.	—
Tm	69	100	168,93423	100	Стаб.	—
Yb	70	104	173,93887	31,6	Стаб.	—
Lu	71	104	174,94079	97,36	Стаб.	—
Hf	72	108	179,94656	32,5	Стаб.	—
Ta	73	108	180,94801	99,99	Стаб.	—
W	74	110	183,95095	30,7	Стаб.	—
Re	75	112	186,95577	62,60	β^-	$4 \cdot 10^{10}$ лет
Os	76	115	190,96094	—	β^-, γ	15,4 суток
	76	116	191,96149	41,0	Стаб.	—
Ir	77	114	190,96060	37,3	Стаб.	—
	77	116	192,96294	62,7	Стаб.	—
Pt	78	117	194,96479	33,8	Стаб.	—
Au	79	118	196,96656	100	Стаб.	—
Hg	80	122	201,97063	29,8	Стаб.	—
Tl	81	124	204,97441	70,5	Стаб.	—
Pb	82	124	205,97446	24,1	Стаб.	—
	82	125	206,97589	22,1	Стаб.	—
	82	126	207,97664	52,3	Стаб.	—
	82	128	209,98418	—	α, β^-, γ	22,3 года
	82	129	210,98874	—	β^-, γ	36,1 мин
	82	130	211,99188	—	β^-, γ	10,64 часа
	82	131	213,99980	—	β^-, γ	26,8 мин
Bi	83	126	208,98039	100	Стаб.	—
	83	128	210,98726	—	α, β^-, γ	2,15 мин
Po	84	126	209,98286	—	α, γ	138,38 суток
	84	130	213,99519	—	α, γ	$1{,}64 \cdot 10^{-4}$ с
At	85	133	218,00870	—	α, β^-	2 с
Rn	86	136	222,017574	—	α, γ	3,8235 сут
Fr	87	136	223,019734	—	α, β^-, γ	21,8 мин
Ra	88	138	226,025406	—	α, γ	$1{,}60 \cdot 10^3$ лет
Ac	89	138	227,027751	—	α, β^-, γ	21,773 года
Th	90	138	228,02873	—	α, γ	1,9131 года
Pa	91	140	231,035881	—	α, γ	$3{,}28 \cdot 10^4$ лет
U	92	140	232,03714	—	α, γ	72 года
	92	141	233,039629	—	α, γ	$1{,}592 \cdot 10^5$ лет
	92	143	235,043925	0,72	α, γ	$7{,}038 \cdot 10^8$ лет
	92	144	236,045563	—	α, γ	$2{,}342 \cdot 10^7$ лет
	92	146	238,050786	99,275	α, γ	$4{,}468 \cdot 10^9$ лет
	92	147	239,054291	—	β^-, γ	23,5 мин
Np	93	146	239,052932	—	β^-, γ	2,35 сут
Pt	94	145	239,052158	—	α, γ	$2{,}41 \cdot 10^4$ лет
Am	95	148	243,061374	—	α, γ	$7{,}37 \cdot 10^3$ лет
Cm	96	149	245,065487	—	α, γ	$8{,}5 \cdot 10^3$ лет
Bk	97	150	247,07003	—	α, γ	$1{,}4 \cdot 10^3$ лет
Cf	98	151	249,074849	—	α, γ	351 год
Es	99	155	254,08802	—	α, β^-, γ	276 суток
Fm	100	153	253,08518	—	α, γ	3,0 сут
Md	101	154	255,0911	—	α	27 мин
No	102	153	255,0933	—	α	3,1 мин
Lr	103	154	257,0998	—	α	$\sim$35 с
Ku	104	157	261,1087	—	α	1,1 мин
Ns	105	157	262,1138	—	α	0,7 мин
	106	157	263,1184	—	α	0,9 с

Примечания. 1. Приведены массы нейтральных атомов в а.е.м. 2. Указано содержание (в процентах) в естественных условиях.

Таблица 56. **Бета- и гамма-радиоактивные ядра**

Элемент	Массовое число	Период полураспада	Энергия излучения, МэВ	
			β-частицы	γ-излучение
Углерод	14	5730 лет	0,155	—
Натрий	24	15,0 ч	1,39	1,38; 2,76
Фосфор	32	14,3 сут	1,71	—
Сера	35	87,4 сут	0,167	—
Хлор	36	$3{,}1 \cdot 10^5$ г	0,714	—
Кальций	45	152 сут	0,254	—
Титан	51	5,8 мин	2,13	0,32; 0,61; 0,93
Хром	51	28 сут	—	0,32; 0,57
Железо	55	2,9 лет	—	0,21
»	59	45 сут	0,46; 0,27	1,1; 1,29
Кобальт	60	5,3 лет	0,3	1,17; 1,33
Селен	75	127 сут	—	0,2—0,4
Стронций	89	51 сут	1,46	—
Цирконий	95	65 сут	0,36; 0,40; 0,88	0,23; 0,72; 0,75
Серебро	110	270 сут	0,087; 0,53; 2,12; 2,86	0,1—2,5
»	111	7,5 сут	0,7; 0,8; 1,0	0,25; 0,34
Кадмий	109	43 сут	0,7; 1,61	0,5—1,3
»	115	470 сут	—	0,087
Иод	131	8,4 сут	0,25; 0,34; 0,61; 0,82	0,08—0,72
Цезий	137	27 лет	0,51; 1,17	0,66
Вольфрам	185	73,2 сут	0,37; 0,43	0,056; 0,57; 0,77
Иридий	192	74,4 сут	0,10; 0,26; 0,54; 0,67	0,2—0,9
Золото	198	2,7 сут	0,29; 0,96; 1,37	0,41—1,09
»	199	3,15 сут	0,29; 0,44; 0,47	0,05; 0,16; 0,21
Ртуть	205	5,6 мин	1,8	0,23

Таблица 57. **Моменты импульсов и магнитные моменты нуклонов и ядер**

Z	Ядро	Массовое число	I, $\hbar$	Магнитный момент, μ_N
0	n	1	1/2	−1,9125
1	p	1	1/2	2,7928
1	D	2	1	0,8565
2	He	3	1/2	−2,131
		4	0	0
3	Li	6	1	0,821
		7	3/2	3,2532
4	Be	9	3/2	−1,176
5	B	11	3/2	2,686
6	C	12	0	0
		13	1/2	0,701
7	N	14	1	0,403
		15	1/2	−0,280
8	O	16	0	0
17	Cl	35	5/2	1,368
29	Cu	63	3/2	2,2265
		65	3/2	2,3847
48	Cd	111, 113	1/2	−0,65
		110, 112 114, 116	0	0

Продолжение

Z	Ядро	Массовое число	I, $\hbar$	Магнитный момент, μ_N
80	Hg	199	1/2	0,5
		201	3/2	−0,6
		198, 200	0	0
		200, 204	0	0
82	Pb	207	1/2	0,6
		204, 206, 208	0	0

Примечание. Знак «минус» указывает на то, что направления магнитного и механического моментов противоположны.

Таблица 58. **Реакции синтеза и энерговыделение**

№ п/п	Реакция	Энергия, МэВ	$\sigma_м$, барн	Энергия частиц, МэВ
1	$p+p \to d+\beta^+ +\nu$	2,2	10^{-23}	—
2	$p+d \to {}^3He+\gamma$	5,5	10^{-6}	—
3	$p+t \to {}^4He+\gamma$	19,7	10^{-6}	—
4	$d+d \to t+p$	4,0	0,16	2
5	$d+d \to {}^3He+n$	3,3	0,09	1
6	$d+d \to {}^4He+\gamma$	24,0	—	—
7	$d+t \to {}^4He+n$	17,6	5,0	0,13
8	$t+d \to {}^4He+n$	17,6	5,0	0,19
9	$t+t \to {}^4He+2n$	11,3	0,10	1,0
10	$d+{}^3He \to {}^4He+p$	18,4	0,71	0,47
11	${}^3He+{}^3He \to {}^4He+2p$	12,8	—	—
12	$n+{}^6Li \to {}^4He+t$	4,8	2,6	0,26
13	$p+{}^6Li \to {}^4He+{}^3He$	4,0	10^{-4}	0,3
14	$p+{}^7Li \to 2{}^4He+\gamma$	17,3	$6\cdot10^{-3}$	0,44
15	$d+{}^6Li \to {}^7Li+p$	5,0	0,01	1,0
16	$d+{}^6Li \to 2{}^4He$	22,4	0,026	0,6
17	$d+{}^7Li \to 2{}^4He+n$	15,0	10^{-3}	0,2
18	$p+{}^9Be \to 2{}^4He+d$	0,56	0,46	0,33
19	$p+{}^9Be \to {}^6Li+{}^4He$	2,1	0,35	0,33
20	$p+{}^{11}B \to 3{}^4He$	8,7	0,6	0,67
21	$p+{}^{15}N \to {}^{12}C+{}^4He$	5,0	0,69	1,2

Примечание. d — дейтрон (ядро дейтерия ^2H), t — тритон (ядро трития ^3H), $\sigma_м$ — максимальное значение эффективного сечения. В последней графе указаны энергии бомбардирующих частиц, соответствующие максимальным значениям $\sigma_м$.

Таблица 59. **Термоядерные реакции во Вселенной**

Реакция	Энергия, МэВ	Среднее время реакции
	Водородный цикл	
$p+p \to d+\beta^+ +\nu$	0,33 (0,51)	$1{,}4 \cdot 10^{10}$ лет
$\beta^+ +\beta^- \to 2\gamma$	2,04	—
$p+d \to {}^3He+\gamma$	10,98	5,7 с
${}^3He+{}^3He \to {}^4He+2p$	12,85	10^6 лет
	Углеродный цикл	
$p+{}^{12}C \to {}^{13}N+\gamma$	1,95	$1{,}3 \cdot 10^7$ лет
${}^{13}N \to {}^{13}C+\beta^+ +\gamma$	1,5 (0,7)	7 мин
$p+{}^{13}C \to {}^{14}N+\gamma$	7,54	$2{,}7 \cdot 10^6$ лет
$p+{}^{14}N \to {}^{15}O+\gamma$	7,35	$3{,}3 \cdot 10^8$ лет
${}^{15}O \to {}^{15}N+\beta^+ +\gamma$	1,73 (0,98)	82 с
$p+{}^{15}N \to {}^{12}C+{}^4He$	4,96	$1{,}1 \cdot 10^5$ лет

Примечание. В скобках указана энергия нейтрино. Времена реакций рассчитаны для условий в центре Солнца ($T \simeq 1{,}3 \cdot 10^7$ К, плотность водорода 100 г/см^3).

Таблица 60. **Дозовые пределы облучения**

«Нормами радиационной безопасности НРБ-76/87» устанавливаются следующие категории облучаемых лиц: категория А — персонал, категория Б — ограниченная часть населения, категория В — население области, края, республики, страны. В порядке убывания чувствительности к облучению устанавливается три группы критических органов: I группа — все тело, гонады, красный костный мозг; II группа — мышцы, щитовидная железа, жировая ткань, печень, почки, селезенка, желудочно-кишечный тракт, легкие, хрусталик глаза; III группа — кожный покров, костная ткань, кисти, предплечья, голени и стопы.

Дозовые пределы внешнего и внутреннего облучения, Зв (зиверт) за год	Группы критических органов		
	I	II	III
Предельно допустимая доза для категории А, ПДД	0,05	0,15	0,3
Предел дозы для категории Б, ПД	0,005	0,015	0,03

Примечания. 1. Для категории А (за исключением женщин до 40 лет) распределение дозы излучения в течение года не регламентируется.
2. В любом случае доза, накопленная к 30 годам, не должна превышать 12 ПДД.
3. Для женщин до 40 лет доза облучения на область таза не должна превышать 0,01 Зв за любые 2 месяца.
4. Регламентация облучения категории В устанавливается Министерством здравоохранения СССР.

Приложения

I. Расчет погрешностей

Прямые и косвенные измерения. Измерения называются *прямыми*, если значения величин определяются приборами непосредственно (например, измерение длины линейкой, определение времени секундомером, силы тока — амперметром).

Если значение измеряемой величины определяется посредством прямых измерений других величин, которые связаны с измеряемой величиной определенной зависимостью, то такие измерения называются *косвенными.* Примером косвенных измерений может служить определение сопротивления участка цепи путем измерения силы тока и напряжения, определение плотности по прямым измерениям массы и объема.

Абсолютная и относительная погрешность. Пусть проведено измерение (без систематических погрешностей) одной и той же величины x несколько раз и отдельные результаты измерений имеют значения $x_1, x_2, \ldots, x_n$. В качестве наилучшего значения выбирается среднее значение

$$x_{\text{ср}} = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i.$$

Разность $|x_{\text{ср}} - x_i| = \Delta x_i$ называется *абсолютной погрешностью* единичного измерения.

Среднее значение абсолютной погрешности n единичных измерений

$$r_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \Delta x_i$$

называется *средней погрешностью* (средней абсолютной погрешностью). Отношение средней погрешности к среднему значению измеренной величины x_c называется *относительной погрешностью*

$$\frac{r_n}{x_{\text{ср}}} = \left(\sum_i \Delta x_i\right) / \left(\sum_i x_i\right).$$

Стандартное (*среднеквадратичное*) *отклонение* (СО). Определяет среднюю погрешность единичных измерений при нормальном распределении; приближенно СО рассчитывается по формуле

$$S_n=\sqrt{\frac{\Delta x_1^2+\Delta x_2^2+\ldots+\Delta x_n^2}{n}}$$

При большом числе измерений $\lim\limits_{n\to\infty} S_n=\sigma$; строго говоря, величина σ и является стандартным отклонением, а $\lim\limits_{n\to\infty} r_n=\rho$ является средней погрешностью.

Средняя квадратичная погрешность, которая обусловлена заменой величины σ величиной S_n, может быть рассчитана по соотношению

$$\sigma_{sn}=\sigma/\sqrt{2(n-1)}.$$

Следует заметить, что при расчете стандартного отклонения иногда вместо n используется значение $n-1$.

Стандартное отклонение среднего. Средняя погрешность ряда единичных измерений имеет меньшее значение по сравнению с погрешностью единичного измерения; средняя погрешность результата n единичных измерений называется *стандартным отклонением среднего* (СОС)

$$\sigma_n=\sigma\sqrt{n},$$

где σ — стандартное отклонение.

Стандартное отклонение среднего указывается тогда, когда оценивается погрешность значений по результатам всех приведенных измерений; стандартное отклонение указывается при оценке погрешности метода измерений.

Пример. Результаты измерений сопротивления одного и того же резистора представлены в таблице. Рассчитаем значения $R_{ср}$, σ, σ_n:

№	R_1, Ом	№	R_1, Ом
1	175	6	174
2	175	7	176
3	173	8	172
4	175	9	175
5	178	10	174

$$R_{ср}=\frac{\sum R_i}{10}=174{,}7 \text{ Ом};$$

стандартное отклонение

$$\sigma=\sqrt{\sum \Delta R_i^2/10}=1{,}5 \text{ Ом};$$

стандартное отклонение среднего

$$\sigma_{10}=1{,}5/\sqrt{10}=0{,}5 \text{ Ом}.$$

Результат измерений записывается в следующей форме:

$$R=174{,}7\pm0{,}5 \text{ Ом}.$$

Учет систематических погрешностей. Если систематическая погрешность определяется лишь по модулю, но неизвестен ее знак, то полная погрешность

$$\Delta_п=\sqrt{\sigma^2+\sigma_c^2},$$

где σ — стандартное отклонение, σ_c — систематическая погрешность. Если известен знак систематической ошибки, то она суммируется со средним значением измеряемой величины.

Расчет погрешностей в косвенных измерениях. Если аргументы x_1, x_2, ..., x_n функции $f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ измерены с погрешностями δx_1, δx_2, ..., δx_n, то стандартное отклонение функции

$$\Delta Z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\delta x_2\right)^2 + \ldots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\delta x_n\right)^2}$$

при условии, что погрешности δx_1, δx_2, ..., δx_n независимы и случайны.

Стандартное отклонение функции

$$\Delta Z \leqslant \left|\frac{\partial f}{\partial x_1}\right|\delta x_1 + \left|\frac{\partial f}{\partial x_2}\right|\delta x_2 + \ldots + \left|\frac{\partial f}{\partial x_n}\right|\delta x_n. \quad (*)$$

Правая часть (*) соответствует средней абсолютной погрешности функции. Абсолютные и относительные погрешности простейших функций приводятся в таблице.

Функция	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
$A+B$	$\Delta A+\Delta B$	$(\Delta A+\Delta B)/\lvert A+B\rvert$
$A-B$	$\Delta A+\Delta B$	$(\Delta A+\Delta B)/\lvert A-B\rvert$
$A\cdot B$	$A\Delta B+B\Delta A$	$\Delta A/\lvert A\rvert+\Delta B/\lvert B\rvert$
A/B	$(A\Delta B+B\Delta A)/B^2$	$\Delta A/\lvert A\rvert+\Delta B/\lvert B\rvert$
A^n	$nA^{n-1}\Delta A$	$n\Delta A/\lvert A\rvert$
$\sqrt[n]{A}$	$A^{(1-n)/n}\Delta A/n$	$\Delta A/(n\lvert A\rvert)$
$\sin A$	$\lvert\cos A\rvert\Delta A$	$\lvert\operatorname{ctg} A\rvert\Delta A$
$\cos A$	$\lvert\sin A\rvert\Delta A$	$\lvert\operatorname{tg} A\rvert\Delta A$

Округление средних значений. 1) Если первая отбрасываемая цифра больше пяти, то предшествующая цифра увеличивается на единицу; в противном случае последняя цифра остается без изменения; 2) когда отбрасываемая цифра есть пять, а цифр младших разрядов нет, то сохраняется предшествующая цифра без изменений, если она четная, или увеличивается на единицу, если она нечетная.

Округление погрешностей.

1) Значение погрешностей округляется: а) до одной значащей цифры, если первая значащая цифра не равна единице; б) до двух значащих цифр, если первая цифра равна единице.

2) В среднем значении величины указываются все цифры до последнего разряда, указанного в записи погрешности.

Например, погрешность при измерении диаметра стержня составляет 0,02 мм; среднее значение $d_{ср}=22{,}534$, результат измерений записывается следующим образом: $d=22{,}53\pm0{,}02$ мм. Неправильные записи: $d=22{,}5\pm0{,}02$ или $d=22{,}534\pm0{,}02$.

Пример. Скорость звука определяется в воздухе по первой гармонике воздушного столба в трубе. Длина столба $L=100\pm0{,}1$ см, частота $\nu=165\pm1$ Гц.

Скорость звука $v=2L\nu=33000$ см/с$=330$ м/с.

Рассчитаем погрешность по формуле

$$\frac{\partial v}{\partial L}\delta L=2\nu\delta L=2\cdot165\cdot0{,}1;\quad \frac{\partial v}{\partial \nu}\delta\nu=2L\delta\nu=2\cdot100\cdot1;$$

$$\Delta v=\sqrt{(2\nu\delta L)^2+(2L\delta\nu)^2}\simeq200 \text{ см/с}.$$

Ответ: $v=330\pm2$ м/с.

II. Множители для образования десятичных кратных и дольных единиц

Наименование	Множитель	Обозначение	
		русское	международное
экса	10^{18}	Э	E
гета	10^{15}	П	P
тера	10^{12}	Т	T
гига	10^{9}	Г	G
мега	10^{6}	М	M
кило	10^{3}	к	k
гекто	10^{2}	г	h
дека	10	да	da
деци	10^{-1}	д	d
санти	10^{-2}	с	c
милли	10^{-3}	м	m
микро	10^{-6}	мк	μ
нано	10^{-9}	н	n
пико	10^{-12}	п	p
фемто	10^{-15}	ф	f
атто	10^{-18}	а	a

III. Некоторые внесистемные единицы в единицах СИ

Единицы длины и площади

1 ангстрем (Å) $=10^{-10}$ м

1 икс-единица (X) $=10^{-13}$ м

1 дюйм $=2{,}54\cdot10^{-2}$ м

1 ферми $=10^{-15}$ м

1 астрономическая единица (а.е.) $= 1{,}49 \cdot 10^{11}$ м
1 световой год (св. год) $= 9{,}46 \cdot 10^{15}$ м
1 миля $= 1{,}61 \cdot 10^{3}$ м
1 морская миля $= 1{,}85 \cdot 10^{3}$ м
1 гектар (га) $= 10^{4}$ м^2
1 барн (б) $= 10^{-28}$ м^2

Единицы массы

1 тонна (т) $= 1000$ кг
1 центнер (ц) $= 100$ кг
1 карат (кар) $= 2 \cdot 10^{-4}$ кг
1 фунт $= 0{,}454$ кг
1 а.е.м. $= 1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг
1 унция (тройская) $= 31{,}103$ г

Единицы силы

1 дин $= 10^{-5}$ Н
1 килограмм-сила (кгс) $= 9{,}81$ Н

Единицы работы и энергии

1 эрг $= 10^{-7}$ Дж
1 кгс · м $= 9{,}81$ Дж
1 калория (кал) $= 4{,}19$ Дж
1 эВ $= 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Дж
1 ватт-час (Вт · ч) $= 3{,}6 \cdot 10^{3}$ Дж

Единицы мощности

1 эрг/с $= 10^{-7}$ Вт
1 килокалория в час (ккал/ч) $= 1{,}16$ Вт
1 л.с. $= 736$ Вт

Единицы давления

1 дин/см^2 $= 0{,}1$ Па
1 кгс/м^2 $= 9{,}81$ Па
1 ат $=$ 1 кгс/см^2 $= 9{,}81 \cdot 10^{4}$ Па
1 атм $= 1{,}01 \cdot 10^{5}$ Па
1 мм рт. ст. $= 133$ Па

Единицы силы тока и электрического заряда

1 ед.СГС$_I$ $= (10/c)$ А $= 1/(3 \cdot 10^{9})$ А
1 ед.СГС$_Q$ $= (10/c)$ Кл $= 1/(3 \cdot 10^{9})$ Кл
1 ед.СГСМ$_I$ $= 10$ А
1 ед.СГСМ$_Q$ $= 10$ Кл

Единицы напряженности электрического тока

1 ед.СГС$_E$ $= c \cdot 10^{-6}$ В/м $= 3 \cdot 10^{4}$ В/м
1 В/см $= 100$ В/м

Единицы электрической емкости

1 ед.СГС$_C$ $= (1/c) \cdot 10^{9}$ Ф $= (1/9) \cdot 10^{-11}$ Ф

Единицы электрического сопротивления и удельного сопротивления

1 ед.СГС$_R$ $= c^2 \cdot 10^{-9}$ Ом $= 9 \cdot 10^{11}$ Ом
1 Ом · см $= 10^{-2}$ Ом · м
1 Ом · мм^2/м $= 10^{-6}$ Ом · м
1 ед.СГС$_\rho$ $= 9 \cdot 10^{9}$ Ом · м

Единицы магнитной индукции и магнитного потока

1 гаусс (Гс) $= 10^{-4}$ Тл
1 Вб/см^2 $= 10^{4}$ Тл
1 максвелл (Мкс) $= 10^{-8}$ Вб

Единицы напряженности магнитного поля

1 эрстед (Э) $= 1/(4\pi) \cdot 10^3$ А/м 1 А/см $= 100$ А/м

Единицы индуктивности

1 ед.СГС$_L$ $= 10^{-9}$ Гн

Единицы яркости и освещенности

1 кд/см^2 $= 10^4$ кд/м^2 1 фот $= 10^4$ лк

1 стильб (сб) $= 1{,}005 \cdot 10^4$ кд/м^2

Единицы активности нуклидов (ядер)

1 кюри (Ки) $= 3{,}7 \cdot 10^{10}$ Бк 1 резерфорд (Рд) $= 10^6$ Бк

Единицы дозы и мощности поглощенной дозы излучения

1 рад $= 10^{-2}$ Гр 1 эрг/г $= 10^{-4}$ Гр

1 рад/с $= 10^{-2}$ Гр/с 1 эрг/(с · г) $= 10^{-4}$ Гр/с

Единицы экспозиционной дозы излучения

1 рентген (Р) $= 2{,}58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг

IV. Универсальные физические константы (ГСССД I—88)

Скорость света в вакууме c	$2{,}99792 \cdot 10^8$ м/с
Гравитационная постоянная γ	$6{,}672 \cdot 10^{-11}$ Н · м^2/кг^2
Молярный объем идеального газа V_μ ($T_0 = 273{,}15$ К, $p_0 = 1{,}01 \cdot 10^5$ Па)	22,4138 л/моль
Универсальная газовая постоянная R	8,314 Дж/(К · моль)
Постоянная Фарадея F	96485 Кл/моль
Постоянная Авогадро N_A	$6{,}02204 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$
Постоянная Больцмана k	$1{,}38066 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Масса покоя протона m_p	$1{,}67265 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя электрона m_e	$9{,}10953 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя нейтрона m_n	$1{,}67495 \cdot 10^{-27}$ кг
Отношение масс покоя протона и электрона m_p/m_e	1836,1515
Заряд электрона e	$1{,}60219 \cdot 10^{-19}$ Кл
Постоянная Вина b	0,0028978 м · К
Постоянная Планка h	$6{,}6262 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Постоянная Стефана — Больцмана σ	$5{,}67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м · К^4)
Постоянная Ридберга R_∞	$1{,}09737318 \cdot 10^7$ м$^{-1}$
Магнетон Бора $\mu_Б$	$9{,}27408 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Магнетон ядерный μ_N	$5{,}05082 \cdot 10^{-27}$ Дж/Тл

Магнитный момент электрона μ_e $9{,}28483 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Магнитный момент протона μ_p $1{,}4106171 \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл

V. Основные формулы и законы

Механика

Перемещение $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ (1.1)

Путь $\Delta l = l_2 - l_1$ (1.2)

Средняя скорость $\mathbf{v}_{ср} = \Delta \mathbf{r} / \Delta t$ (1.3а)

Мгновенная скорость $\mathbf{v} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \dfrac{d\mathbf{r}}{dt}$ (1.3б)

Среднее ускорение $\mathbf{a}_{ср} = \dfrac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$ (1.4а)

Мгновенное ускорение (ускорение) $\mathbf{a} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \dfrac{d\mathbf{v}}{dt}$ (1.4б)

Проекции скорости на оси прямоугольной системы координат $v_x = \dfrac{dx}{dt}, \quad v_y = \dfrac{dy}{dt}, \quad v_z = \dfrac{dz}{dt}$ (1.5)

Проекции ускорения на оси прямоугольной системы координат $a_x = \dfrac{dv_x}{dt}, \quad a_y = \dfrac{dv_y}{dt}, \quad a_z = \dfrac{dv_z}{dt}$ (1.6)

Тангенциальное ускорение $a_\tau = \dfrac{dv_\tau}{dt}$ (1.10)

Нормальное ускорение $a_n = \dfrac{v_\tau^2}{\rho}$ (1.11)

Модуль вектора скорости $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$ (1.7)

Модуль вектора ускорения $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} =$ (1.8)

$= \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$ (1.12)

Уравнения скорости и пути равнопеременного движения $v_t = v_0 \pm at$, $s = v_0 t \pm at^2/2$ (1.24)–(1.25)

Средняя угловая скорость $\omega_{ср} = \dfrac{\Delta \varphi}{\Delta t}$ (1.14)

Мгновенная угловая скорость (угловая скорость) $\omega = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \dfrac{d\varphi}{dt}$ (1.15)

Угловое ускорение	$\beta = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}$	(1.17)
Линейная скорость (движение материальной точки по окружности)	$v = R\omega$	(1.20а)
Линейное ускорение	$a = \beta R$	(1.26а)
Центростремительное ускорение	$a_{ц} = \omega^2 R$	(1.21)
Космические скорости (п. 1, гл. I, с. 26)	$v_1 = \sqrt{Rg}$, $v_2 = v_1\sqrt{2} = \sqrt{2Rg}$, $v_3 = \sqrt{2\gamma M / R_c}$	
Основной закон движения (второй закон Ньютона) в инерциальной системе отсчета	$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$	(1.32), (1.33)
Основной закон движения в неинерциальной системе отсчета	$\mathbf{F} + \mathbf{F}_{и} + \mathbf{F}_{цб} + \mathbf{F}_{к} = m\mathbf{a}'$, $\mathbf{F}_{и} = -m\mathbf{a}_0$, $\mathbf{F}_{цб} = m\omega^2\boldsymbol{\rho}$, $\mathbf{F}_{к} = 2m[\mathbf{v}'\boldsymbol{\omega}]$	(1.56)–(1.59)
Момент силы относительно точки	$\mathbf{M} = [\mathbf{r}\mathbf{F}]$	(1.36)
Момент импульса (количества движения) относительно точки	$\mathbf{L} = [\mathbf{r}\mathbf{p}]$	(1.37)
Момент инерции материальной точки	$I = mr^2$	(1.38)
Основное уравнение динамики вращательного движения материальной точки	$\mathbf{M} = \frac{d\mathbf{L}}{dt}$	(1.39)
Основное уравнение вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной оси	$I\beta = M_z$	(1.40)
Закон всемирного тяготения	$F = \frac{\gamma m_1 m_2}{R^2}$	(1.86)
Сила тяготения	$F_{т} = \frac{\gamma m M_3}{R_3^2}$	(1.87)
Сила тяжести	$\mathbf{G} = \mathbf{F}_{т} + \mathbf{F}_{ц}$	(1.88)
Вес тела	$\mathbf{P} = \mathbf{G} - m\mathbf{a}$	(1.89)
Сила трения скольжения	$F_{тр} = fP$	(1.61)
Сила трения качения	$F_{к} = f_{к}\frac{P}{R}$	(1.62)

Элементарная работа силы	$\Delta A = F \Delta s \cos \varphi$	(1.64)
Работа переменной силы	$A = \int_s F \cos \varphi \, ds$	(1.66)
Кинетическая энергия (при малых скоростях)	$E_к = \frac{1}{2} m v^2$	(1.70)
Кинетическая энергия (при больших скоростях)	$E_v = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0 c^2$	(1.79)
Кинетическая энергия вращающегося тела	$E_\omega = \frac{1}{2} I \omega^2$	(1.78)
Потенциальная энергия тела в поле тяготения	$E_п = -\frac{\gamma m M}{R}$	(1.80)
Закон Гука	$\sigma_п = \varepsilon E,$	(1.97)
	$\tau = G \gamma$	(1.98)
Законы сохранения в замкнутой системе:		
— энергии	$E_к + U_п = \text{const}$	(1.74)
— импульса (количества движения)	$\sum \mathbf{p}_i = \text{const}$	(1.75)
— момента импульса (момента количества движения)	$\sum \mathbf{L}_i = \text{const}$	(1.76)
Уравнение Бернулли	$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g h + p = \text{const}$	(1.103)
Внутреннее трение жидкостей	$F_{вт} = -\eta S \frac{\Delta v}{\Delta t}$	(1.105)
Гидродинамическая сила	$F_{гд} = C_x \rho v^2 S/2$	(1.106)
Уравнение гармонических колебаний	$\xi = A_0 \cos(\omega t + \varphi)$	(1.111)
Период колебаний:		
— математического маятника	$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$	(1.113)
— маятника с упругой связью	$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$	(1.114)
— крутильного маятника	$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{D}}$	(1.117)
— физического маятника	$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mga}}$	(1.118)

Амплитуда результирующего смещения двух гармонических волн, имеющих одинаковые частоты и направления	$A_{\text{р}}=\sqrt{A_1^2+A_2^2+2A_1A_2\cos(\varphi_2-\varphi_1)}$	(1.121)
Длина волны	$\lambda=vT=\frac{v}{f}$	(1.122)
Уравнение плоской гармонической волны	$\xi=A\cos(\omega t-kr)$	(1.123)
— стоячих плоских гармонических волн	$u=2A\cos(kx)\cos(\omega t)$	(1.131)

Термодинамика и молекулярная физика

Средняя удельная теплоемкость	$c_{\text{ср}}=\frac{Q}{m(T_2-T_1)}$	(2.1)
Удельная теплоемкость	$c=\frac{1}{m}\lim\limits_{\Delta T\to 0}\frac{\Delta Q}{\Delta T}=\frac{1}{m}\frac{dQ}{dt}$	(2.3)
Молярная теплоемкость	$C=\mu c$	(2.4)
Первый закон термодинамики	$\Delta Q+\Delta A=\delta U$	(2.6)
Работа термодинамической системы	$A=\int\limits_{V_1}^{V_2}p\,dV$	(2.8)
Работа идеального газа:		
— при изобарическом процессе	$A_{\text{р}}=\frac{m}{\mu}R\Delta T$	(2.19)
— при изотермическом процессе	$A_{\text{т}}=\frac{m}{\mu}RT\ln\frac{\text{p}_1}{\text{p}_2}$	(2.21)
— при адиабатическом процессе	$A_Q=\frac{m}{\mu}C_V(T_1-T_2)$	(2.22)
Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева — Клапейрона)	$pV=\frac{m}{\mu}RT$	(2.16)
Уравнение Ван-дер-Ваальса	$\left(p-\frac{\nu^2 a}{V^2}\right)(V-\nu b)=\nu RT$ $\nu=m/\mu$	(2.23)
Уравнение теплопроводности	$\Delta Q=-\lambda S\Delta t\frac{\Delta T}{\Delta l}$	(2.31)
Уравнение диффузии	$\Delta M=-DS\Delta t\frac{\Delta\rho}{\Delta l}$	(2.33)

Средняя скорость молекул идеального газа	$v_{ср}=\sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$	(2.25)
Средняя квадратичная скорость молекул идеального газа	$v_{кв}=\sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$	(2.26)
Средняя длина свободного пробега идеального газа	$l=\frac{kT}{\sqrt{2}\,\pi\sigma^2 p}$	(2.24)
Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов	$pV=\frac{2}{3}E=\frac{1}{3}Mv_к^2$	(2.28)
Теплопроводность идеального газа	$\lambda=\frac{1}{3}\rho v_{ср} l c_p$	(2.32)
Вязкость идеального газа	$\eta=\frac{1}{3}\rho v_{ср} l$	(2.35)
Коэффициент диффузии идеального газа	$D=\frac{1}{3}v_{ср} l$	(2.34)

Электродинамика (единицы СИ и СГС)

Закон Кулона	$\mathbf{F}_{12}=\frac{Q_1 Q_2 \mathbf{r}_0}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r^2}$, $\mathbf{F}=\frac{Q_1 Q_2 \mathbf{r}_0}{\varepsilon r^2}$	(3.1)
Напряженность поля точечного заряда	$E=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r^2}$, $E=\frac{Q}{\varepsilon r^2}$	(3.17)
Напряженность поля внутри плоского конденсатора	$E=\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}$, $E=\frac{4\pi\sigma}{\varepsilon}$	(3.19)
Работа по перемещению заряда в электрическом поле	$A_{12}=Q(\varphi_1-\varphi_2)$	(3.14)
Электрическая емкость	$C=Q/(\varphi_1-\varphi_2)$	(3.16)
Емкость плоского конденсатора	$C=\frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$, $C=\frac{\varepsilon S}{4\pi d}$	(3.25)
Электрический момент диполя	$P_i=Ql$	(3.2)
Поляризованность	$\mathbf{P}=\varkappa\varepsilon_0 \mathbf{E}$, $\mathbf{P}=\varkappa\mathbf{E}$	(3.7)

Электрическое смещение	$\mathbf{D}=\varepsilon_0\mathbf{E}+\mathbf{P}, \quad \mathbf{D}=\mathbf{E}+4\pi\mathbf{P}$	(3.9)
Зависимость между ε и $\varkappa$	$\varepsilon=1+\varkappa, \quad \varepsilon=1+4\pi\varkappa$	(3.9)
Плотность энергии электрического поля	$w=\varepsilon_0\varepsilon E^2/2, \quad w=\varepsilon E^2/(8\pi)$	(3.15)
Закон Ома для участка цепи без ЭДС	$I=(\varphi_1-\varphi_2)/r$	(3.37)
Обобщенный закон Ома	$I=(\varphi_1-\varphi_2+\mathscr{E})/r$	(3.38)
Работа электрического тока	$A=IUt$	(3.46)
Электрическое сопротивление	$r=\rho l/S$	(3.42)
Взаимодействие параллельных проводников стоками	$F=\dfrac{\mu_0\mu I_1 I_2 l}{2\pi a}, \quad F=\dfrac{1}{c^2}\dfrac{2\mu I_1 I_2 l}{a}$	(3.72)
Магнитный поток	$\Phi=BS\cos\varphi$	(3.79)
Магнитная индукция	$\mathbf{B}=\mu_0\mu\mathbf{H}_c, \quad \mathbf{B}=\mu\mathbf{H}_c$	(3.73)
Зависимость между μ и $\varkappa$	$\mu=1+\varkappa, \quad \mu=1+4\pi\varkappa$	(3.98)
Закон Био — Савара — Лапласа	$\Delta B=\dfrac{\mu_0 I\Delta l\sin\alpha}{4\pi r^2}, \quad \Delta B=\dfrac{I\Delta l\sin\alpha}{c^2 r^2}$	(3.74)
Магнитная индукция прямого тока	$B=\dfrac{\mu_0\mu I}{2\pi r}, \quad B=\dfrac{2\mu I}{cr}$	(3.75)
Закон Ампера	$\Delta\mathbf{F}=I[\Delta\mathbf{l}\mathbf{B}], \quad \Delta\mathbf{F}=\dfrac{I}{c}[\Delta\mathbf{l}\mathbf{B}]$	(3.67)
Сила Лоренца	$\mathbf{F}=Q[\mathbf{v}\mathbf{B}], \quad \mathbf{F}=\dfrac{1}{c}[\mathbf{v}\mathbf{B}]$	(3.65)
Закон электромагнитной индукции	$\mathscr{E}=-\dfrac{d\Phi}{dt}, \quad \mathscr{E}=-\dfrac{1}{c}\dfrac{d\Phi}{dt}$	(3.85)
Индуктивность соленоида	$L=\dfrac{k\mu_0\mu N^2 S}{l}, \quad L=\dfrac{4\pi\mu N^2 S}{l}$	(3.91)
Плотность энергии магнитного поля	$w=\dfrac{B^2}{2\mu_0\mu}, \quad w=\dfrac{\mu H^2}{8\pi}$	(3.82)
Вектор Пойнтинга	$\mathbf{S}=[\mathbf{E}\mathbf{H}], \quad \mathbf{S}=\dfrac{c}{4\pi}[\mathbf{E}\mathbf{H}]$	(3.118)
Скорость электромагнитных волн в среде	$c_1=1/\sqrt{\mu_0\mu\varepsilon_0\varepsilon}, \quad c_1=c/\sqrt{\varepsilon\mu}$	(3.117)

Оптика, атомная и ядерная физика

Закон отражения	$i = i'$	(см. с. 140)
Закон преломления	$\frac{\sin i}{\sin r} = n$	(4.6)
Показатель преломления стекла, из которого изготовлена призма	$n = \frac{\sin(\delta_м/2 + P/2)}{\sin(P/2)}$	(4.8)
Формула тонкой линзы	$-\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f}$	(4.9)
Видимое увеличение:		
— лупы	$\Gamma_л = \frac{250}{f}$	(4.14)
— микроскопа	$\Gamma_м = \frac{250\Delta}{f_1 f_2}$	(4.15)
— зрительной трубы	$\Gamma_т = \frac{f_{об}}{f_{ок}}$	(4.16)
Результирующая амплитуда двух плоских гармонических волн	$E_{ор} = \sqrt{E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\cos\theta}$	(4.17)
Дифракция света на дифракционной решетке (при нормальном падении):		
— условие главных минимумов	$a\sin\beta_{мин} = m\lambda$ $(m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots)$	(4.24)
— условие главных максимумов	$d\sin\beta_{макс} = m\lambda$ $(m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots)$	(4.24)
— условие дополнительных минимумов	$d\sin\beta_{дм} = m'\lambda/N$ $m' = 1, 2, \ldots, N-1, N+1, \ldots$ (m' не кратно N)	(4.26)
Разрешаемое микроскопом расстояние	$l_р \geqslant \frac{\lambda}{2n\sin u}$	(4.27)
Давление электромагнитных волн	$p = \frac{E_э}{c}(1+\rho)$	(4.31)
Основное уравнение фотоэффекта	$h\nu = A + \frac{1}{2}m_e v_м^2$	(4.32)
Законы теплового излучения:		
— закон Кирхгофа	$\frac{E_{\lambda T}}{A_{\lambda T}} = \varepsilon_{\lambda T}$	(4.33)
— закон Стефана — Больцмана	$R_э = \sigma T^4$	(4.34)
— закон смещения Вина	$\lambda_м = \frac{b}{T}$	(4.35)

— формула Планка	$\varepsilon_{\lambda T}=\frac{2\pi c^2}{\lambda^5}\frac{h}{e^{hc/(k\lambda T)}-1}$	(4.36)
Длина волны де Бройля	$\lambda=\frac{h}{p}$	(5.1)
Энергетические уровни водородоподобных атомов	$E_n=-\frac{m_e Z^2 e^4}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2}$	(5.4)
Орбитальный момент импульса электрона	$M_l=\hbar\sqrt{l(l+1)}$	(5.5)
Собственный момент импульса (спин) электрона	$M_s=\hbar\sqrt{s(s+1)}$	(5.7)
Энергия связи ядра	$\Delta E=\Delta M c^2$	(5.11)
Радиоактивный распад ядер	$N=N_0 e^{-\lambda t}=N_0 2^{-t/T}$	(5.13)
Эффективное сечение ядерной реакции	$\sigma=\frac{\Delta N}{N n_0 \Delta Z}$	(5.15)

VI. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева

ПЕРИОДЫ	РЯДЫ	I	ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ			
1	I	(H)	II	III	IV	V
2	II	3 Li литий 6,941	4 Be бериллий 9,01218	бор 5 B 10,81	углерод 6 C 12,011	азот 7 N 14,0067
3	III	11 Na натрий 22,98977	12 Mg магний 24,305	алюминий 13 Al 26,98154	кремний 14 Si 28,0855	фосфор 15 P 30,97376
4	IV	19 K калий 39,0983	20 Ca кальций 40,08	21 Sc скандий 44,9559	22 Ti титан 47,90	23 V ванадий 50,9415
	V	медь 29 Cu 63,546	цинк 30 Zn 65,38	галлий 31 Ga 69,72	германий 32 Ge 72,59	мышьяк 33 As 74,9216
5	VI	37 Rb рубидий 85,468	38 Sr стронций 87,62	39 Y иттрий 88,9059	40 Zr цирконий 91,22	41 Nb ниобий 92,9064
	VII	серебро 47 Ag 107,868	кадмий 48 Cd 112,41	индий 49 In 114,82	олово 50 Sn 118,69	сурьма 51 Sb 121,75
6	VIII	55 Cs цезий 132,9054	56 Ba барий 137,33	57 La* лантан 138,9055	72 Hf гафний 178,49	73 Ta тантал 180,9479
	IX	золото 79 Au 196,9665	ртуть 80 Hg 200,59	таллий 81 Tl 204,37	свинец 82 Pb 207,2	висмут 83 Bi 208,9804
7	X	87 Fr франций [223]	88 Ra радий 226,0254	89 Ac** актиний [227]	104 Ku [261] курчатовий	105 (Ns) [нильсборий]

*ЛАНТА

58 Ce церий 140,12	59 Pr празеодим 140,9077	60 Nd неодим 144,24	61 Pm прометий [145]	62 Sm самарий 150,4	63 Eu европий 151,96	64 Gd гадолиний 157,25

**АКТИ

90 Th торий 232,0381	91 Pa протактиний 231,0359	92 U уран 238,029	93 Np нептуний 237,0482	94 Pu плутоний [244]	95 Am америций [243]	96 Cm кюрий [247]

Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА	VII	VIII		
VI	водород 1 H 1,0079	гелий 2 He 4,00260		
кислород 8 O 15,9994	фтор 9 F 18,998403	неон 10 Ne 20,179		
сера 16 S 32,06	хлор 17 Cl 35,453	аргон 18 Ar 39,948		
24 Cr хром 51,996	25 Mn марганец 54,9380	26 Fe железо 55,847	27 Co кобальт 58,9332	28 Ni никель 58,70
селен 34 Se 78,96	бром 35 Br 79,904	криптон 36 Kr 83,80		
42 Mo молибден 95,94	43 Tc технеций 98,9062	44 Ru рутений 101,07	45 Rh родий 102,9055	46 Pd палладий 106,4
теллур 52 Te 127,60	иод 53 I 126,9045	ксенон 54 Xe 131,30		
74 W вольфрам 183,85	75 Re рений 186,207	76 Os осмий 190,22	77 Ir иридий 192,2	78 Pt платина 195,09
полоний 84 Po [209]	астат 85 At [210]	радон 86 Rn [222]		
106 (EW) экавольфрам	107 (ERe) экарений			

атомный номер — 81 Tl таллий — атомная масса [относит.] 204,37

НОИДЫ

65 Tb тербий 158,9254	66 Dy диспрозий 162,50	67 Ho гольмий 164,9304	68 Er эрбий 167,26	69 Tm тулий 168,9342	70 Yb иттербий 173,04	71 Lu лютеций 174,967

НОИДЫ

97 Bk [247] берклий	98 Cf [251] калифорний	99 Es [254] эйнштейний	100 Fm [257] фермий	101 Md [258] менделевий	102 (No) [255] (нобелий)	103 (Lr) [256] (лоуренсий)

Предметный указатель

Адиабата 75
Адроны 180
Аккумулятор 109
Активность 177
Амплитуда волны 60
— колебаний 54
Аннигиляция 174
Антенна 136
Античастица 180

Барионы 181
Беккерель 177
Блок 42
Бозоны 180

Вектор единичный 9
— Пойнтинга 136
Векторы 7
Вес 44
Взаимодействие зарядов 91, 117
— фундаментальное 178
Влажность 90
Волна 59
— линейно поляризованная 153
— плоская 60
— поперечная 61
— продольная 61
— сферическая 61
— цилиндрическая 61
— электромагнитная 135
Волны когерентные 149
Восприимчивость диэлектрическая 94
— магнитная 127
Вращение плоскости поляризации 185
Вязкость 51, 82

Газ идеальный 74, 78
Гипероны 180
Гистерезис магнитный 142
Глюоны 179
Гравитоны 181
Градиент плотности 81
— потенциала 96
— скорости 51
— температур 80
Громкость звука 62
Грэй 177

Давление звуковое 63
— критическое 76
— парциальное 74
— света 156
Движение жидкости 48
— — вязкой 49
— — идеальной 48
— механическое 23
— равнозамедленное 25
— равномерное 25
— равноускоренное 25
— тела в поле тяготения 26, 27
Дефект массы 170
Деформация 46
— относительная поперечная 47
— — продольная 47
— сдвига 47
— упругая 47
Диамагнетики 127
Динамика 28
— вращательного движения 31
Диоптрия 144
Диполь электрический 93
Дисперсия 153
Дифракционная решетка 151
Дифракция 150
Диффузия 81
Длина волны 60
— — де Бройля 163
— свободного пробега 78
Доза поглощенная 177

Домены 122, 142
Домкрат винтовой 43

Единицы физических величин 11—20

Жидкие кристаллы 85
Жидкость вязкая 50
— идеальная 50

Закон Ампера 117
— Архимеда 49
— Био—Савара—Лапласа 130
— Бойля—Мариотта 75
— всемирного тяготения 43
— Гей-Люссака 75
— Гука 48
— Дальтона 74
— Кирхгофа 160
— Кирхгофа—Бунзена 159
— Кулона 92
— Ома 103
— Паскаля 49
— сохранения зарядов 91
— — импульса 40
— — момента импульса 40
— — энергии 40
— Стефана—Больцмана 161
— Столетова 157
— Шарля 75
Законы внешнего фотоэффекта 157
— Кеплера 44
— Ньютона 29, 30
— термодинамики 69
— Фарадея 108
— Фурье 80
Заряд электрический 91
— элементарный 92
Звук 62
Зона валентная 113
— запрещенная 113
— проводимости 114

Излучение тепловое 160
Изобары 168
Изотопы 168
Импульс 30
Индуктивность 124, 125
Индукция магнитная 119
— электромагнитная 121
Индукция электростатическая 121
Инертность 29
Интенсивность 62
Интерференция 148
Инфразвук 62
Ионизация газов 111
Ионы 92, 108, 165
Испарение 72
Испускательная способность 160

Квантовые числа 165
Кварки 183
Кинематика 21
Кипение 72
Колебания вынужденные 57
— гармонические 54
— затухающие 56
— электрические 134
Количество движения 30
Конденсация 72
Контур колебательный 135
Коэффициент затухания 57
— качества 177
— квазиупругой силы 55
— мощности 132
— ослабления линейный 177
— — массовый 177
— отражения звука 63
— поглощения звука 63
— пропускания 63
— Пуассона 48
Кривые намагничения 128
Кристалл 84

Лептоны 181
Линза 141
Линии магнитной индукции 120
— напряженности 98
— Фраунгофера 187
Лучепреломление двойное 154

Магнетон Бора 163
— ядерный 163
Магнитострикция 129
Масса 29
— молярная 68
Массовое число 168
Маятник крутильный 55
— математический 54
— с упругой связью 54
— физический 56
Мезоны 180, 181

Модель атома 164
— идеального газа 78
Модуль объемной упругости 48
— сдвига 48
— Юнга 48
Моль 11
Момент диполя электрический 93
— импульса 31
— инерции 32, 33
— контура магнитный 118
— силы 31
Мощность 38, 106
— поглощенной дозы 177

Намагниченность 126
Напряжение механическое 47
— электрическое 104
Напряженность коэрцитивная 129
— поля магнитного 119
— — тяготения 44
— — электрического 93, 98
Нейтрон 167
Нуклид 168
Нуклоны 167

Оболочки электронные 166
Оптика геометрическая 143
Оптическая сила 144
Орбита стационарная 164
Освещенность 138
Отражение диффузное 140
— полное 141

Пар насыщенный 72
Парамагнетики 127
Параметры критические 76
— термодинамические 66
Перемещение 22
Период колебаний 54
— — — контура 144
— обращения 24
— полураспада 172
Петля гистерезиса 128
Плазма 90
Плотность вещества 29
— заряда поверхностная 100
— тока электрического 108, 111
— энергии магнитного поля 122
— — электрического поля 96
Поверхность волновая 50
— эквипотенциальная 96
Поглощательная способность 160
Погрешность измерений 216
Подвижность 108
Показатель поглощения 63
— преломления 141
Поле гравитационное 43
— магнитное 117
— потенциальное 38
— электрическое 91
— — вихревое 122
— электромагнитное 135
Полимеры 87
Полиспаст 42
Полный излучатель 160
Полупроводники 113
Полюсы магнитные 163
Поляризация диэлектрика 94
— света 153
Порог болевого ощущения 63
— слышимости 62
Постоянная Авогадро 79
— Больцмана 79
— вращения 156
— — удельная 156
— гравитационная 43
— Планка 157
Потенциал электрического поля 95
— электрохимический 128
Поток звуковой энергии излучения 62
— магнитный 121
— тепловой 80
Правила Кирхгофа 106
Правило винта (правого) 9,24
— Ленца 123
Предел прочности 48
— разрешения 152
— текучести 49
— упругости 49
Приборы оптические 145—148
Примеси акцепторные 115
— донорные 115
Принцип Паули 166
Проводимость дырочная 114
— несамостоятельная 111
— примесная 115
— самостоятельная 112
— электронная 114
Проницаемость диэлектрическая 95
— магнитная 127
Протон 167, 182

Работа 37, 70
— выхода 112
— ионизации 111

Работа консервативных сил 39
— сил Ампера 122
Радиоактивность 171
Радиоактивные процессы 171
Распределение Максвелла 79
Реакции ядерные 173—174
Резонанс механический 57
— электрического контура 134
Рычаг 42

Самоиндукция 124
Свет естественный 153
— поляризованный 153
Светимость 138
Сжимаемость 48
Сила 28
— Ампера 117
— гидродинамическая 52
— гравитационная 43.
— диссипативная 40
— инерции 35
— квазиупругая 55
— консервативная 38
— Кориолиса 35
— коэрцитивная 142
— Лоренца 117
— магнитная 117
— света 138
— тока электрического 101
— трения 35
— тяготения 43
— тяжести 44
— упругости 47
— центробежная 35
Силы сторонние 103
— ядерные 169
Система единиц 9
— отсчета 21
— — инерциальная 29
— — неинерциальная 34
— термодинамическая 66
Скорость колебаний частиц 59
— космическая 26, 27
— мгновенная 28
— молекул 79
— равномерного движения 25
Скорость средняя 22
— угловая 24
— электромагнитных волн 135
Смещение электрическое 94
Сопротивление емкостное 133
— индуктивное 133
— электрическое 105
— — удельное 105
Спектральная плотность энергетической светимости 160
Спектры 158
— испускания 158
— линейчатые 158
— поглощения 159
— характеристические рентгеновские 167
Спин 166
Сублимация 72

Тембр 62
Температура 66, 68
— кипения 72
— критическая 76
— Кюри 128
— стеклования 89
— текучести 89
Температурный коэффициент длины 73
— — объема 73
— — сопротивления 105
Теплоемкость 67
— молярная 68
— удельная 67
Теплопроводность 80
Теплота 67
— парообразования 73
— плавления 73
— фазового перехода 73
Ток индукционный 123
— насыщения 112
— переменный 131
— постоянный 101
— смещения 129
— эффективный 131
Точка материальная 21
Траектория 21
Трение качения 36
— покоя 35
— скольжения 36
— сухое 35

Увеличение оптических приборов 146
Угол Брюстера 154
— предельный 141
— смачивания 83
Ультразвук 62
Уравнение адиабаты 75
— Бернулли 50
— Ван-дер-Ваальса 76
— волны 60, 61, 64

Уравнение Менделеева — Клапейрона 74
— фотоэффекта 186
Уравнения Максвелла 129
Уровни энергии 165
Ускорение кориолисово 34
— нормальное 23
— полное 24
— тангенциальное 23
— угловое 24
— центростремительное 34

Фаза колебаний 54
— — начальная 54
— термодинамическая 72
Фермионы 180
Ферромагнетики 128
Фигуры Лиссажу 58, 59
Физические константы универсальные 221
Фокусы линзы 142
Формула Планка 161
— Пуазейля 52
— Стокса 52
Формула тонкой линзы 143
Фотометрические величины 138
Фотон 156
Фотоэффект 157

Центр инерции (масс) 45, 47
— тяжести 45

Частицы элементарные 180—182
Частота колебаний 54
— угловая 54
Черное тело 160
Числа квантовые 165
Число барионное 181
— волновое 60, 137
— массовое 168

Эквивалент электрохимический 109
Эквивалентная доза 178
Электрический ток 101
Электродвижущая сила 103
Электроемкость 97, 100
Электролиз 109
Электролиты 108
Электронвольт 163
Электропроводность плазмы 112
— полупроводников 113
Элемент тока 119
Элементарные частицы 180
Элементы гальванические 109
Эмиссия термоэлектронная 112
Энергия 38
Энергия внутренняя 69
— излучения 171
— ионизации 165
— кинетическая 38, 40
— потенциальная 39, 40
— — деформированного стержня 41
— связи ядра 170
Энтропия 71
Эффективное сечение ядерной реакции 173

Ядро атома 167
Яркость 138

Справочное издание

КОШКИН *Николай Иванович*

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ФИЗИКА: СПРАВОЧНИК

Заведующий редакцией *Н. А. Носова*
Редактор *В. Я. Дубнова*
Младший редактор *Е. Б. Тихонова*
Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*
Технический редактор *Л. В. Лихачева*
Корректоры: *Н. Б. Румянцева, Н. Д. Дорохова*

ИБ № 41137

Сдано в набор 18.12.89. Подписано к печати 07.12.90. Формат 84 × 108/32.Бумага тип. № 2. Гарнитура таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,6. Усл. кр.-отт. 25,62. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 385 000 экз. (1-й завод 1 – 150 000 экз.). Заказ №4062 Цена 2 р.

Издательско-производственное и книготорговое объединение «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография» Государственного Комитета СССР по печати. 113054 Москва В-54, Валовая, 28

Отпечатано с диапозитивов в типографии издательства «Коммуна». г. Воронеж, проспект Революции, 39

Вниманию учащихся!

ВСЕСОЮЗНЫЕ ЗАОЧНЫЕ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ КУРСЫ ПРИГЛАШАЮТ

учащихся 10 и 11 классов общеобразовательных школ и СПТУ, а также работающую молодежь, желающую поступать в ВУЗы.

Всесоюзные заочные подготовительные курсы (ВЗПК) ЦЗНДИСИ при Академии наук СССР проводят целенаправленную индивидуальную подготовку к поступлению в Высшие учебные заведения. Основу занятий составляет самостоятельная работа учащихся по методическим пособиям, реализующим педагогически обоснованную систему подготовки. Пособия содержат краткое изложение теоретического материала, примеры выполнения типовых заданий с необходимыми рекомендациями высококвалифицированных специалистов и индивидуально ориентированные контрольные работы.

Учащиеся ВЗПК обеспечиваются информацией об избранном учебном заведении и особенностях вступительных экзаменов.

Обучение осуществляется по математике, физике, химии, биологии, русскому языку и литературе, истории, обществоведению, географии, английскому языку, украинскому языку и литературе, казахскому языку и литературе. Филиалы ВЗПК в Киеве и Алма-Ате осуществляют обучение не только на русском языке, но и на языках этих республик.

На курсы принимаются лица с любым уровнем начальной подготовки. Обучение платное. Инвалиды с детства, воспитанники детских домов, воины-интернационалисты имеют льготы. О формах оплаты и условиях зачисления можно узнать, написав в адрес удобного отделения ВЗПК. Рекомендуем выбирать отделение либо по месту жительства, либо по месту нахождения избранного вуза. Во всех остальных случаях обращайтесь в Центральное отделение ВЗПК.

Адреса отделений ВЗПК:

129110, Москва, ВЗПК;

190000, Ленинград, ЛТО ВЗПК;

252001, Киев, УРО ВЗПК;

480100, Алма-Ата, САКО ВЗПК.

2 p.